

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude
de MASTER ACADEMIQUE**
Spécialité : **Génie Micro-électronique**
Filière : **Génie Electrique**

Présenté par
**Nassima
SARNI**

Mémoire dirigé par Dr. El-Hachemi AMARA

Thème

**Modélisation de la formation de cratères
produits par ablation laser sur verre
borosilicate BK7**

*Mémoire soutenu publiquement le 29 septembre 2014 devant le jury composé
de :*

M. Ahcene LAKHLEF
UMMTO, Président

M. El-Hachemi AMARA
CDTA, Encadreur

M. Arezki BENFDILA
UMMTO, Examineur

Mme. Farida HAMADI
CDTA, Examinatrice

A

Ma chère famille ;
surtout mes parents,

Mes amis,

Tous ceux que j'aime
et ceux qui m'aiment,

Ainsi que tous ceux qui me sont chers.

Nassima

Remerciements

Arrivant au terme de ce travail, je tiens à adresser mes remerciements aux personnes qui m'ont apporté leur aide.

En premier lieu, ma reconnaissance va à mon promoteur, Dr. El-Hachemi AMARA, qui m'a bien guidée et orientée dans le travail tout au long de mon stage pratique au Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) ; ainsi que Mme. Farida HAMADI, qui m'a donné de bons conseils pour le bon déroulement du travail.

Je remercie Pr. Arezki BENFDILA, le responsable de la spécialité « Génie Microélectronique » ; ainsi que tous mes enseignants qui m'ont attribué une bonne formation.

Je tiens également à remercier M. Mohand ZERIFI, qui m'a aidée dans tous mes déplacements.

Merci à tous les étudiants de Génie Microélectronique, pour les conseils et les bons moments partagés.

Mes remerciements vont également aux membres de jury pour avoir accepté de juger mon travail.

Finalement, je remercie ma famille, qui m'a soutenue tout au long de mes études, sans oublier tous mes amis, surtout Ahmed ZIAR et Claude Brice ASSONGMO qui m'ont bien encouragée.

Merci.

SOMMAIRE

Introduction Générale	7
Chapitre 1 : Cadre Théorique	11
1.1. Rappels sur le laser.....	11
1.2. Equation de la chaleur 3D.....	14
1.3. Equations de Navier-Stokes (Modèle hydrodynamique).....	15
1.4. Changement de phase (solide-liquide-vapeur-plasma).....	16
1.5. Interaction laser nanoseconde-diélectrique.....	17
Chapitre 2 : Description et Modélisation	19
2.1. Méthode des volumes finis.....	19
2.2. Méthode «Volume Of Fluid (VOF)» pour les problèmes multiphasiques.....	20
2.3. Dynamique de la génération de cratères lors de l'interaction Laser-matière.....	21
2.4. Mise en œuvre de la modélisation par les logiciels GAMBIT et FLUENT.....	23
Chapitre 3 : Présentation et Discussion des Résultats	32
3.1. Paramètres de la modélisation.....	32
3.2. Les différentes étapes de la modélisation.....	33
3.3. Les résultats de la modélisation.....	33
Conclusion Générale	50
Références Bibliographiques	52
Annexe 1.....	56
Annexe 2.....	57

Liste des figures et des tableaux

<i>Fig.1-Image d'un cratère (modélisé par FLUENT)-.....</i>	23
<i>Fig.2-Version de GAMBIT utilisée-.....</i>	24
<i>Fig.3-Plateforme de GAMBIT utilisée-.....</i>	24
<i>Fig.4-Maillage utilisé dans GAMBIT-.....</i>	25
<i>Fig.5-Types de cellules-.....</i>	27
<i>Fig.6-Convergence de la température statique-.....</i>	35
<i>Fig.7-Contours de la fraction volumique précisant la profondeur du cratère-.....</i>	35
<i>Fig.8-Contours de la température statique (plan horizontal)-.....</i>	36
<i>Fig.9-Contours de la température statique (plan vertical)-.....</i>	36
<i>Fig.10-Contours de la pression statique (plan horizontal)-.....</i>	37
<i>Fig.11-Contours de la pression statique (plan vertical)-.....</i>	37
<i>Fig.12-Contours de la fraction liquide (plan horizontal)-.....</i>	38
<i>Fig.13-Contours de la fraction liquide (plan vertical)-.....</i>	38
<i>Fig.14-Contours de la fraction volumique (plan horizontal)-.....</i>	39
<i>Fig.15-Contours de la fraction volumique (plan vertical)-.....</i>	39
<i>Fig.16-Evolution de la température-.....</i>	40
<i>Fig.17-Evolution de la température statique selon le plan horizontal-.....</i>	41
<i>Fig.18-Evolution de la température statique selon le plan vertical-.....</i>	42
<i>Fig.19-Evolution de la pression statique selon le plan horizontal-.....</i>	43
<i>Fig.20-Evolution de la pression statique selon le plan vertical-.....</i>	44
<i>Fig.21-Evolution de la fraction liquide selon le plan horizontal-.....</i>	45
<i>Fig.22-Evolution de la fraction liquide selon le plan vertical-.....</i>	46
<i>Fig.23-Evolution de la fraction volumique selon le plan horizontal-.....</i>	47
<i>Fig.24-Evolution de la fraction volumique selon le plan vertical-.....</i>	48
<i>Tableau 1-Types de zones répertoriés par catégorie-.....</i>	28
<i>Tableau 2-Récapitulatif des étapes de la modélisation-.....</i>	27

Résumé:

Le sujet concerne l'étude par modélisation de l'interaction laser-matière, menant à la formation de cratères sur un substrat en borosilicate de type BK7. On s'intéresse à un faisceau laser de type Nd-YAG doublé, de longueur d'onde 532 nm. Les pulses laser délivrés sont de l'ordre de la dizaine de nanosecondes.

Le substrat traité se trouve dans un environnement sous ambiance atmosphérique normale, ce qui implique une étude multiphasique, mettant en présence le substrat sous ses formes solide, liquide, et gazeuse jusqu'à l'état plasma, ainsi que le gaz qui constitue l'air environnant.

Mots Clés:

- Modélisation
- Interaction laser-matière
- Cratères
- Substrat en borosilicate de type BK7
- Laser de type Nd-YAG
- Longueur d'onde 532 nm
- Etude multiphasique
- Etats de la matière

Abstract:

The subject concerns the modeling study of the laser-material interaction, leading to the formation of craters on a substrate borosilicate BK7. We interested in a laser beam of Nd-YAG doubled with a wavelength of 532 nm. The laser pulses are delivered in the order of tens of nanoseconds.

The treated substrate is in an environment under normal atmospheric environment, which implies a multiphase study, putting the substrate in its solid, liquid and gas form, to the plasma state, also the gas which is ambient air.

Keywords:

- Modeling
- Laser-material interaction
- Craters
- Substrate borosilicate BK7
- Laser of Nd-YAG
- Wavelength of 532 nm
- Multiphase study
- States of material

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Le terme LASER est l'acronyme anglais de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Schématiquement, un laser comprend un résonateur optique, un milieu amplificateur et une source d'énergie. La longueur d'onde du rayonnement laser (sa couleur) dépend de la nature du milieu amplificateur. L'apport d'énergie est assuré par un système de pompage externe à la cavité (décharge électrique, radiofréquence, lampes flashes, diode laser ou laser de pompe). Le rayonnement issu d'une cavité laser est généralement monochromatique, de forte intensité, cohérent et fortement directionnel.

Il existe divers types de laser : CO₂, Nd :YAG, argon, à colorant, à vapeur de cuivre, diode...

Plusieurs technologies sont possibles :

- *les lasers à rayonnement continu*, dont les applications concernent plus particulièrement la découpe, le soudage, la métrologie, l'instrumentation et la visualisation ;
- *les lasers à rayonnement impulsionnel*, dont les applications concernent l'usinage en général, la télémétrie, les télécommunications et la métrologie. La durée d'impulsion varie entre la milliseconde et la femtoseconde. Les recherches actuelles s'intéressent aussi aux phénomènes se produisant dans le domaine de l'attoseconde (laser à électrons libres, laser ELI,...), permettant de suivre la dynamique des atomes et des molécules, ce qui constitue de nouveaux horizons à explorer dans le domaine des nanoapplications [1].

Dans ce travail, on s'intéresse à l'interaction laser-matière par laser impulsionnel pour des applications d'ablation laser par formation de cratères. On utilise un laser Nd:YAG qui émet dans le proche infrarouge à 1.064 μm , et par doublage de fréquence on peut utiliser une longueur d'onde dans le vert à 0.532 μm . Le milieu actif est un barreau de grenat d'aluminium et d'yttrium ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopé par des ions néodyme Nd^{3+} . Le pompage optique est assuré par lampe flash ou diode laser. Ce type de laser peut fonctionner en mode déclenché (Q-switch), avec des impulsions de 1 à 700 ns, permettant de délivrer des puissances crêtes très élevées de l'ordre du gigaWatt. Il

peut aussi fonctionner en mode relaxé en délivrant des impulsions de 0,1 à 20 ms. En industrie, ce type de laser est très utilisé en découpe et en perçage [2].

L'intérêt du régime impulsif par rapport au régime continu, est de pouvoir disposer d'un laser beaucoup plus puissant pour une même consommation d'énergie. Ainsi, si un laser émet une impulsion de 1 ms toutes les secondes, la puissance du faisceau durant cette ms sera 1000 fois supérieure à celle d'un laser continu.

Actuellement certains lasers peuvent générer des impulsions de l'ordre de l'attoseconde. L'inconvénient est cependant que selon le principe d'incertitude d'Heisenberg, plus on réduit la durée des impulsions plus on agrandit la largeur spectral.

Hypothèses du travail :

- Dans l'étude faite par simulation utilisant le logiciel FLUENT /GAMBIT, on considère un échantillon de verre borosilicate BK7 dans un environnement d'air.
- Le problème traité comprend une phase air, une phase liquide correspondant au verre fondu, une phase solide correspondant au verre non irradié, une phase gazeuse correspondant à la vapeur (plasma) produite par évaporation du verre.
- Toutes les phases sont considérées comme des fluides, chacune avec les propriétés correspondantes. Pour l'appliquât est considéré comme étant fluide, et le faisceau laser est assimilé à une source de chaleur. Pour le suivi d'interfaces, on utilise la méthode « Volume Of Fluid (VOF) » mise en œuvre dans le processeur FLUENT.
- Le modèle sur lequel l'étude est faite, est composé de deux volumes superposés (Le substrat en verre borosilicate BK7, et l'air ambiant au-dessus) ayant les mêmes dimensions chacun. Un fichier « Journal » est édité par le logiciel GAMBIT qui est un pré-processeur utilisé pour définir la géométrie du problème, son maillage et la réservation des conditions aux limites. On donne en annexe plus de détails sur l'utilisation de GAMBIT...
- Le laser appliqué sur le substrat est représenté par un volume d'énergie (W/m^3) focalisée au niveau de l'interface air/substrat.
- L'évaporation menant à la formation d'un plasma sous l'effet du laser induit une pression de recul.
- Toutes les interactions qui passent dans le modèle commencent au niveau de l'interface qui lie le substrat avec l'air ambiant.
- Les températures prélevées dans cette étude concernant la « zone test » qui est située au centre de la « tache laser ».

Ce travail est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre représente un cadre théorique concernant le chauffage, la fusion et la vaporisation de la matière par laser impulsionnel nanoseconde.

Dans le second chapitre, on décrit et on présente la modélisation développée de l'interaction laser nanoseconde-verre.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus.

CHAPITRE 1

Cadre Théorique

Chauffage, fusion et vaporisation de la matière par laser impulsif nanoseconde

1.1. Rappels sur le laser :

La production d'un faisceau laser repose sur le principe de l'émission stimulée introduite par Albert Einstein en 1917. Elle peut être décrite de la façon suivante : lorsqu'un atome absorbe un photon, il atteint un état de surexcitation, c'est-à-dire qu'il acquiert une énergie plus élevée. Si l'atome retrouve son état naturel avec une énergie inférieure, il libère l'excès d'énergie sous la forme d'un photon d'énergie $h\nu$. Ce phénomène qui peut être déclenché ou stimulé permettrait à plusieurs atomes de libérer leur excès d'énergie au même instant (phase cohérente) sous la forme d'un flux d'ondes électromagnétiques contrôlé émettant dans le visible ou l'invisible. En pratique, l'émission stimulée se produit dans une cavité optique, où sont 'enfermés' les atomes «excités» dans un milieu qui peut solide, liquide ou gazeux. Un premier atome se désexcite par émission d'un photon; la probabilité qu'un autre atome en fasse de même est alors deux fois plus grande, car le photon déjà présent «stimule» l'émission. Cette stimulation est proportionnelle au nombre n de photons déjà présents. La probabilité de désexcitation est quant à elle proportionnelle à $n+1$. Plus il y aura de photons dans la cavité plus d'autres seront produits constituant ainsi une réaction en chaîne. Pour produire un faisceau laser, une issue est pratiquée dans la cavité sous la forme d'un miroir à réflexion partielle, permettant d'extraire une partie du rayonnement appelé faisceau laser (les photons réfléchis permettent d'entretenir le processus d'émission stimulée).

Il existe différents types de lasers liés à la nature du milieu actif. Les lasers peuvent être classés comme suit :

- *Lasers à gaz* : Comme son nom l'indique, le milieu actif de ce type de laser est un gaz, pur ou en mélange. Le milieu est habituellement excité par une décharge électrique, mais le pompage peut aussi être optique. Les lasers de ce type sont d'une efficacité moyenne, d'une directivité du faisceau exceptionnelle et d'une puissance variable.
- *Atomes neutres*: dans ce type de laser, le milieu actif est exclusivement constitué d'atomes neutres à l'état gazeux. Le meilleur exemple en est le laser à hélium-néon

(He-Ne), connu pour la pureté de sa longueur d'onde d'émission et la directivité du faisceau obtenu. Il fut le premier laser à gaz mis au point, il délivre une petite puissance en sortie et est relativement peu coûteux à produire. Ces caractéristiques font qu'il soit utilisé pour le positionnement des patients en radiographies, pour la lecture des codes-barres ou pour les expériences d'optique. Dans ce type laser, l'hélium est excité par une décharge électrique, ses atomes vont ensuite exciter les atomes du néon par collision, et par la suite, le néon émet de la lumière. Le laser HeNe est particulièrement utilisé pour son émission dans le visible à travers sa couleur rouge correspondant à une longueur d'onde de $0.6328 \mu\text{m}$. Ce laser peut également émettre à d'autres longueurs d'onde.

- *Moléculaires*: Le laser à gaz moléculaire le plus connu est certainement le laser à dioxyde de carbone (CO_2). Il est surtout reconnu pour sa forte puissance, pouvant aller du milliWatt à plusieurs kiloWatts. Cette caractéristique exceptionnelle lui permet de sectionner un tissu organique et d'empêcher le saignement au cours de la découpe. La cicatrisation se fait alors dans de bonnes conditions suivant le processus naturel. Le milieu actif de ce laser est le plus souvent constitué d'un mélange d'hélium, d'azote et de dioxyde de carbone, mais c'est le CO_2 qui produit le rayonnement laser. Il émet à de nombreuses longueurs d'onde dans l'infrarouge mais est surtout utilisé à $9,4$ et à $10,6 \mu\text{m}$. D'autres gaz moléculaires (N_2 , H_2 , CO et N_2O) sont couramment utilisés pour la mise au point de ce type laser.
- *Ioniques*: Le milieu actif est dans ce cas-ci composé d'ions sous forme gazeuse. Le mieux connu est le laser à argon ionique (Ar^+). Il peut émettre à une vingtaine de longueurs d'onde, allant du vert à l'ultraviolet, avec des puissances variant de 100 mW à 10 W . Les longueurs d'onde de faible puissance sont souvent utilisées dans les spectacles Sons et Lumière.
- *Excimer* : Le milieu actif d'un laser excimer est un gaz de molécules diatomiques excitées, tels que Xe_2 , Kr_2 et Ar_2 . Ce type de laser a été développé pour sa grande puissance (10 à 100 MW) d'émission dans l'ultraviolet. Le laser excimer a de plus une grande efficacité ($1,5$ à 2%) et produit de petites impulsions qui permettent de faire l'ablation des surfaces de tissus ou des incisions. C'est pourquoi il est utilisé pour les chirurgies de la cornée.
- *Lasers à solides* : Les lasers à solide utilisent des verres ou des cristaux comme milieu actif. Le milieu actif se présente sous forme de barreau dont les extrémités sont parfaitement parallèles et ont été recouvertes d'un matériau réfléchissant. De tous les lasers, ce sont ceux qui fournissent la plus grande puissance utile et sont généralement utilisés dans un mode à

impulsions. Les lasers à solide fonctionnent généralement grâce à un pompage optique, que ce soit par la lumière émise par une lampe à décharge ou par un autre laser. Les lasers à solide couvrent une grande partie du spectre électromagnétique, de l'infrarouge à l'ultraviolet. L'un des désavantages des lasers à solide est que le milieu actif peut être endommagé s'il atteint des températures trop élevées. Les défauts qui sont ainsi créés nuisent à la qualité du faisceau laser. C'est d'ailleurs pour cette raison que les lasers à solide fonctionnent généralement en mode à impulsions, ce qui permet de ménager le matériau.

- *YAG* : YAG est l'acronyme de Yttrium Aluminium Garnet et désigne le composé solide $Y_3Al_5O_{12}$. La lumière, dans ce type de laser, est émise par des impuretés (on dit alors que le cristal est dopé) de néodyme (Nd^{3+}). Ces lasers produisent du rayonnement infrarouge dont la puissance varie généralement de 10 à 100 W. Ils sont entre autres utilisés pour façonner des diamants et autres pierres précieuses et pour découper des métaux. Il existe aussi des lasers YAG dopés à l'erbium (Er^{3+}), qui sont particulièrement utilisés en chirurgie plastique pour « effacer » des imperfections de la peau.
- *Rubis* : C'est avec ce type de milieu actif pompé par un flash hélicoïdal, que Theodore Maiman produisit le 16 Mai 1960 la toute première émission d'un faisceau laser. Le rubis est un cristal d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) contenant des impuretés de chrome (Cr^{3+}). Ce sont ces ions qui donnent au rubis sa couleur rouge et qui lui permettent d'émettre du rayonnement laser lorsqu'ils sont excités par la lumière émise par une lampe au xénon. Le laser à rubis émet à une longueur d'onde de $0.6940 \mu m$ et est utilisé entre autres en dermatologie pour l'épilation.
- *Néodyme* : Le milieu actif pour ce type de laser est une petite plaquette (de moins de 1 mm d'épaisseur) composés contenant de néodyme, comme le NPP (NdP_5O_{14}) et le LNP ($LiNdP_4O_{12}$), qui est excitée par un laser à argon.
- *Lasers à semi-conducteurs*: Les lasers à semi-conducteurs sont particulièrement compacts. Ils ont une longueur typique de 100 à 500 μm , avec une couche active sur une épaisseur variant entre 0,1 et 2 μm . Ils possèdent également une efficacité très appréciable d'environ 50%. Le faisceau résultant est cependant peu directionnel, avec une divergence de 5° à 30° , car il est émis par une petite surface de moins de 20 μm de côté. Il est aussi peu puissant : entre 1 et 100 mW. A cause de leur petite taille, les lasers à semi-conducteurs sont notamment utilisés dans les imprimantes laser, les lecteurs de disques compacts et comme source lumineuse pour la fibre optique. Ce sont aussi eux que l'on utilise dans les pointeurs laser.

1.2. Equation de la chaleur 3D :

Les équations fondamentales peuvent être en toute généralité écrites sous la forme:

Variation temporelle = terme de flux + création intérieure

L'expression du flux de chaleur (en W/m^2) s'exprime par la loi de Fourier en 3D par:

$$\vec{q} = -k \vec{\nabla} T \quad (1.1)$$

où k est la conductivité thermique (en W/m-K) et T la température thermodynamique exprimée en Kelvin (K).

On écrit aussi

$$\vec{q} = -k \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (1.2)$$

L'équation de la chaleur en 3D s'écrit donc :

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) = -\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + r \quad (1.3)$$

où ρ (en kg/m^3) est la densité, c_p (en J/kg-K) la capacité calorifique à pression constante. r représente un terme source volumique (en W/m^3), et t le temps (en s).

Compte tenu de la loi de Fourier :

$$\rho c_p \frac{\partial}{\partial t} T = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + r \quad (1.4)$$

Soit lorsque le milieu est homogène :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \vec{\nabla}^2 T + r \quad (1.5)$$

Sous forme développée on obtient l'expression suivante:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + r \quad (1.6)$$

On écrit aussi l'équation de la chaleur avec le Laplacien :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \Delta T + r \quad (1.7)$$

1.3. Equations de Navier-Stokes (Modèle hydrodynamique) :

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui sont censées décrire le mouvement des fluides « newtoniens » (liquide et gaz visqueux ordinaires) dans l'approximation des milieux continus. La résolution de ces équations modélisant un fluide comme un milieu continu à une seule phase incompressible, si elle est possible, est ardue. La cohérence mathématique de ces équations non linéaires n'est pas démontrée. Mais elles permettent souvent par une résolution approchée de proposer une modélisation des courants océaniques et des mouvements des masses d'air de l'atmosphère pour les météorologistes, la simulation numérique du comportement des gratte-ciel ou des ponts sous l'action du vent pour les architectes et ingénieurs, des avions, trains ou voitures à grandes vitesses pour leurs bureaux d'études concepteurs, mais aussi le trivial écoulement de l'eau dans un tuyau et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de divers fluides.

Elles sont nommées d'après deux scientifiques du XIXe siècle, le mathématicien et ingénieur des Ponts, Henri Navier, et le physicien George Gabriel Stokes, le choix oubliant le rôle intermédiaire du physicien Barré de Saint-Venant. Pour un gaz peu dense, il est possible de

dériver ces équations à partir de l'équation de Boltzmann, décrivant un comportement moyen des particules dans le cadre de sa théorie cinétique des gaz.

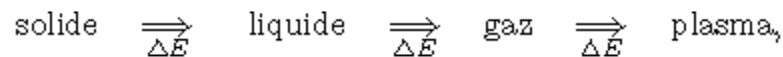
1.4. Changement de phase (solide-liquide-vapeur-plasma) :

En thermodynamique, un changement d'état est une transition de phase lors du passage d'un état de la matière à un autre. Les trois principaux états de la matière sont : solide, liquide et gaz, mais existe plusieurs autres états moins courants : plasma, fluide supercritique, mésophase...

Le changement d'état d'un corps pur est provoqué par une modification de sa pression, de sa température et/ou de son volume.

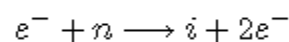
Un plasma est un gaz ionisé. Comme tel, il est donc constitué en général d'électrons, d'ions, d'espèces atomiques ou moléculaires neutres et de photons.

Un gaz ionisé étant obtenu par apport d'énergie à un gaz, les plasmas sont souvent présentés comme un "4ème état" de la matière, faisant suite aux phases solide, liquide et gazeuse :



Le passage d'un état à l'autre étant réalisé par un apport d'énergie donné ΔE .

A la différence des gaz neutres, les plasmas, du fait de leur caractère chargé, sont sensibles à l'action des forces électromagnétiques. Un gaz contenant toujours quelques charges libres (ne serait-ce que par l'effet du rayonnement cosmique), l'application d'un champ électrique peut communiquer une énergie suffisante aux particules les plus mobiles, les électrons, qui produisent une paire électron-ion par collisions sur les espèces neutres selon le schéma réactionnel :



où n désigne un atome ou une molécule neutre et i un ion [3].

1.5. Interaction laser nanoseconde-diélectrique :

Dans les lasers à forte énergie, des composants optiques très divers sont utilisés pour assurer la densification de l'énergie lors de l'amplification, le transport des faisceaux, la conversion de fréquence et la focalisation sur la cible. Il s'agit d'amplificateurs, de polariseurs, de miroirs, d'hublots, de lentilles, de systèmes de protection, de trous de filtrage des faisceaux et de cristaux convertisseurs de fréquence. Ils sont constitués de solides métalliques mais surtout de diélectriques (verres transparents, couches minces, semi-conducteurs) sous forme de milieux massifs ou de couches minces. L'amélioration de la tenue au flux de tous ces composants optiques constitue un défi industriel majeur pour accroître les performances des lasers et améliorer la qualité de la surface d'onde.

Depuis l'invention du laser au début des années 60, les seuils de tenue des matériaux transparents à l'irradiation laser sont étudiés. Une littérature abondante existe pour décrire le claquage optique découvert en 1964 et rendre compte des observations expérimentales encore mal comprises. Les verres transparents à large bande interdite, principalement les halogénures métalliques alcalins ou de terres rares et les oxydes, contiennent des inclusions métalliques, diélectriques ou céramiques, des agrégats d'atomes, des bulles, localisés en surface ou en volume. Pour des irradiations laser allant de quelques dizaines de picosecondes à une microseconde, l'endommagement se produit à partir de ces inclusions ou de ces défauts qui absorbent fortement le rayonnement laser en surface ou en volume. La bande de conduction du diélectrique est peuplée par les électrons issus de ces impuretés. Ces électrons sont accélérés par le rayonnement incident et leur énergie est transférée aux atomes par collision.

Le chauffage du matériau induit sa liquéfaction et sa vaporisation. Il en résulte l'explosion du matériau près de la surface [4].

Le comportement d'un diélectrique soumis à des impulsions laser est défini selon le mode de l'absorption de l'énergie laser, cette dernière est linéaire pour les impulsions brèves et non-linéaires pour les impulsions ultra-brèves [5].

L'absorption laser est couplée à l'hydrodynamique et à la conduction thermique.

CHAPITRE 2

Description et Modélisation

Modélisation de l'interaction laser nanoseconde-verre

2.1. Méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis a été parmi les premières à atteindre un stade de développement avancé pour les calculs d'écoulements stationnaires et instationnaires. Elle a permis une prise en compte des effets de non linéarité et de compressibilité ainsi que les effets de viscosité à l'aide des équations de Navier-Stokes, et de la turbulence.

La méthode des volumes finis a été initialement mise au point pour des lois de conservation hyperboliques, mais des développements récents permettent à présent de l'utiliser pour des équations elliptiques et paraboliques. La méthode des volumes finis supplante les méthodes classiques basées sur les différences finies dans le traitement des problèmes complexes notamment tridimensionnels. Contrairement à la méthode des différences finies qui met en jeu des approximations des dérivées, les méthodes des volumes finis exploitent des approximations d'intégrales.

La mise en œuvre comporte deux étapes importantes :

- le maillage : il consiste à diviser le domaine en plusieurs cellules régulières appelées volumes de contrôle.
- La discrétisation : dans cette étape, les équations sont intégrées dans les volumes de contrôle [6].

L'équation aux dérivées partielles est résolue de manière approchée à l'aide d'un maillage constitué de volumes finis qui sont des petits volumes disjoints (en 3D, des surfaces en 2D, des segments en 1D) dont la réunion constitue le domaine d'étude. Les volumes finis peuvent être construits autour de points d'un maillage initial, mais ce n'est pas une nécessité.

Ces équations aux dérivées partielles contiennent des termes de divergence. En utilisant le théorème de flux-divergence, les intégrales de volume d'un terme de divergence sont transformées en intégrales de surface et ces termes de flux sont ensuite évalués aux interfaces entre les volumes finis.

Un autre avantage de la méthode des volumes finis est qu'elle est facilement utilisable avec des maillages non structurés car, en matière de discrétisation des lois de conservation, sa formulation ne tient aucun compte de la complexité du maillage. En revanche, les caractéristiques géométriques du maillage peuvent jouer un rôle prépondérant lorsque des flux diffusifs entrent en jeu.

2.2. Méthode “Volume Of Fluid (VOF)” pour les problèmes multiphasiques :

Une large part des progrès effectués ces dernières années dans les méthodes de prédiction de l'ingénierie fluide s'est concentrée dans le vaste domaine des écoulements appelés multiphasiques ou polyphasiques, comme les écoulements de mélanges gaz liquide ou les écoulements de suspensions de particules ou de gouttelettes. En complément de nombreux résultats expérimentaux et face à l'insuffisance des modèles globaux développés antérieurement (pour certains depuis les années 1950), l'augmentation constante des efforts de recherche et des moyens numériques a permis d'envisager un traitement de plus en plus précis de ce type d'écoulements, que l'on rencontre dans la majorité des procédés industriels ainsi que dans les domaines de l'environnement et de la santé.

Les écoulements multiphasiques sont des écoulements complexes mettant en jeu une très large gamme d'échelles. On parle généralement de modèles à échelle microscopique, mésoscopique ou macroscopique pour caractériser la finesse du niveau de modélisation. Le terme microscopique désigne, par abus de langage, l'échelle des plus petites discontinuités présentes dans l'écoulement (chacune des phases étant toujours considérée comme un milieu continu). Si l'on prend l'exemple d'un écoulement diphasique à bulles, une approche à l'échelle microscopique reviendrait à déterminer de façon précise l'écoulement du liquide autour de chaque bulle, c'est-à-dire d'effectuer une véritable simulation numérique directe. En revanche, un modèle à l'échelle mésoscopique consisterait à étudier le mouvement d'une bulle assimilée à un point matériel dans un champ liquide donné, à partir d'une loi d'interaction liquide-bulle (issue d'un modèle microscopique) et donc sans se préoccuper des détails au voisinage de l'interface. L'intégration des différentes interactions issues des

modèles à échelle microscopique ou mésoscopique dans des équations de bilans moyennées pour chaque phase aboutit aux modèles macroscopiques eulériens, qui sont bien entendu les plus avantageux en temps de calcul et les plus adaptés aux problèmes réels à grande dimension, mais ne permettent pas actuellement de prendre en compte tous les mécanismes à échelle plus petite et ne donnent pas d'indication sur les propriétés individuelles de chaque particule [7].

Le modèle VOF est une technique de suivi de surface appliqué à un eulérien fixe en maillage. Il est conçu pour deux ou plusieurs fluides non miscibles, où plus la position de l'interface entre les fluides présente un intérêt.

Dans le modèle VOF, un seul ensemble d'équations de quantité de mouvement est partagée par les fluides, et la fraction volumique de chacun des fluides dans chacune des cellules de calcul est suivie tout au long du domaine.

Les applications du modèle VOF comprennent les écoulements stratifiés, les flux de surface libre, de remplissage, ballonnement, le mouvement de grosses bulles dans un liquide, le mouvement du liquide après une rupture de barrage, la prédiction de jet rupture (tension de surface), et la poursuite stable ou transitoire d'une interface liquide-gaz.

Les restrictions suivantes s'appliquent au modèle VOF dans Fluent:

- _ Le solveur pression doit être utilisé, car le modèle de VOF n'est pas compatible aux solveurs à base de densité.
- _ Tous les volumes de contrôle doivent être remplis soit par une phase fluide unique ou une combinaison de phases.
- _ Une seule des phases peut être définie comme un gaz parfait compressible. Il n'y a pas limitation sur l'utilisation de liquides compressibles utilisant des fonctions définies par l'utilisateur (UDF).
- _ Les fractions d'écoulement périodique (soit le débit de masse spécifiée ou chute de pression spécifiée) ne peuvent être modélisées lorsque le modèle VOF est utilisé.

2.3. Dynamique de la génération de cratères lors de l'interaction laser-matière :

L'ablation laser constitue l'une des applications les plus importantes des lasers, toutes catégories confondues. Lorsque la densité d'énergie laser déposée dans la matière dépasse celle associée à la cohésion des atomes ou des molécules, la matière est vaporisée: on parle

alors d'ablation laser. L'ablation laser est soit utilisée directement, comme pour l'usinage de pièces de diverses dimensions, ou indirectement, comme dans la technique de déposition pulsée par laser (PLD ou « pulsed laser deposition »), servant à la fabrication de couches minces, et dans la technique d'analyse chimique LIBS (laser-induced breakdown spectroscopy) où une petite quantité de matière est vaporisée et analysée par spectroscopie d'émission optique.

La plupart des applications de l'ablation laser sont réalisées au moyen d'impulsions relativement longues (nanosecondes) [8].

Pour des durées d'impulsions de quelques nanosecondes (de l'ordre de 10 ns), il existe une différence importante suivant la longueur d'onde utilisée au niveau de l'ablation et donc du cratère formé : la conduction thermique permet la création d'une large couche liquide à la surface de l'échantillon qui va s'évaporer et peut même éjecter des gouttelettes. Le cratère alors formé a des bords irréguliers et donc pas de limite claire avec la surface l'entourant. Cette dernière présente des traces de re-solidification du matériau ainsi que l'existence de « lèvres » soufflées hors du cratère avant solidification. La présence d'une large zone affectée autour du cratère prouve que le plasma a érodé l'échantillon : le faisceau laser n'interagit directement avec la cible que pendant la fraction de l'impulsion nécessaire à l'initiation du claquage et l'érosion de la cible par le plasma tient donc un rôle important.

L'interaction entre le faisceau laser et le plasma chauffe ce dernier et il se dissipe relativement lentement ce qui limite le taux de répétition du laser à quelques dizaines d'Hertz [9].

L'étude des caractéristiques des cratères (profondeur, forme) permet d'obtenir plusieurs types d'informations : l'étude de la profondeur en fonction du nombre d'impulsions appliquées permet d'obtenir l'épaisseur de couche ablatée par impulsion, qui est également calculée dans le modèle et permet ainsi de valider la modélisation de l'ablation. Il est également possible de calculer le seuil d'ablation, qui est l'énergie requise pour obtenir un cratère avec une profondeur donnée.

La dynamique d'ablation n'est pas un mécanisme 'binaire' (il y a ablation pour des énergies supérieures au-delà du seuil mais pas pour des énergies inférieures). Aux basses énergies, des mécanismes de structuration du matériau sont observables [10].

L'image suivante démontre la forme (profondeur) du cratère obtenu lors de la modélisation faite par le logiciel FLUENT :

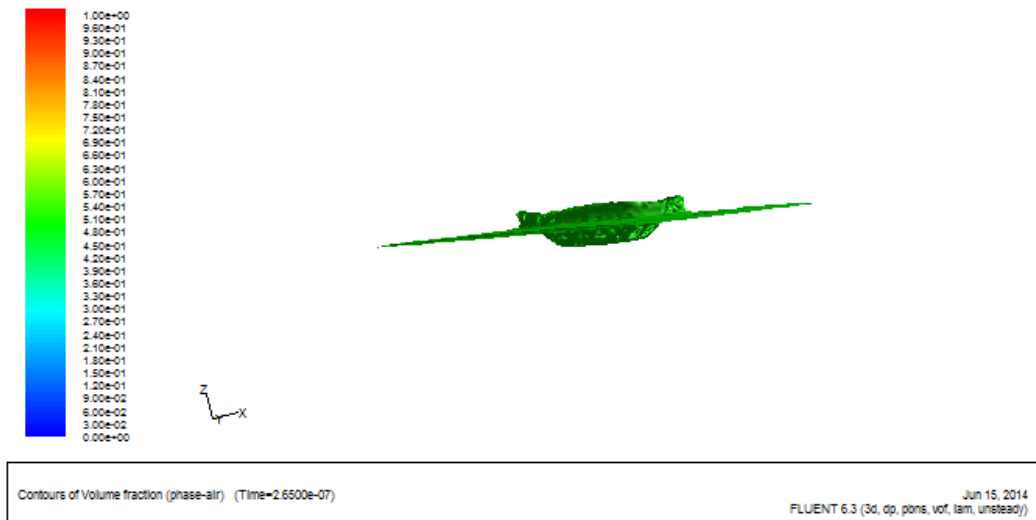


Fig.1-Image d'un cratère (modélisé par FLUENT)-

2.4. Mise en œuvre de la modélisation par les logiciels GAMBIT et FLUENT :

L'étude faite dans ce travail a été mise en œuvre par deux logiciels, et l'ordre des étapes peut être résumé comme suit :

- ✓ GAMBIT { - Pré-traitement (Pre-Processing) → Meshing (Maillage)
- ✓ FLUENT { - Traitement (Processing) → Solver
 - Post-traitement (Post-Processing) → Result of Process

❖ Description de l'environnement GAMBIT:

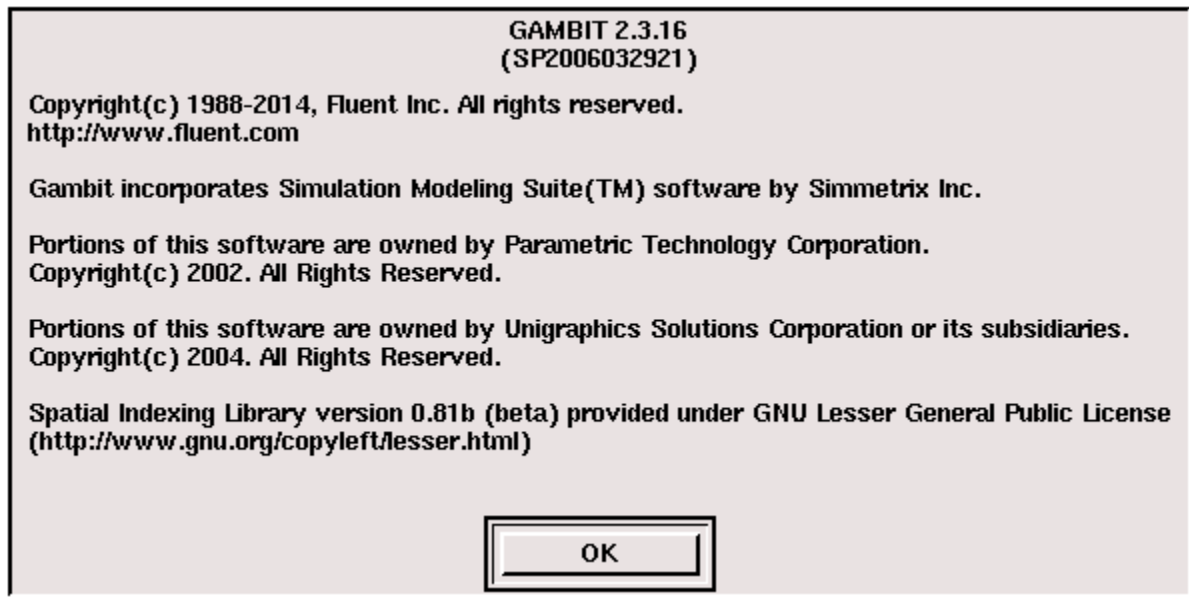


Fig.2-Version de GAMBIT utilisée-

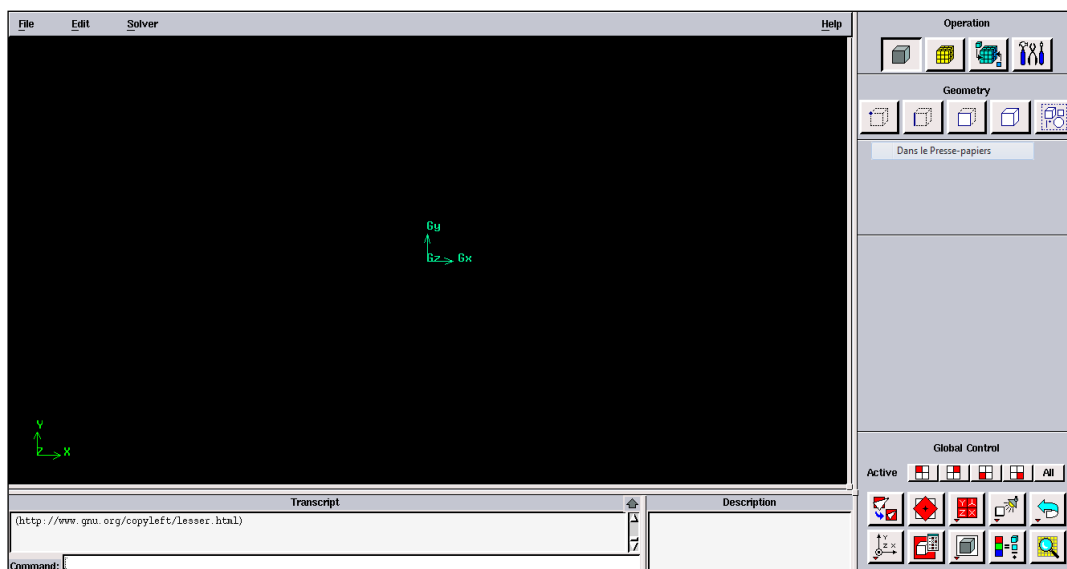


Fig.3-Plateforme de GAMBIT utilisée-

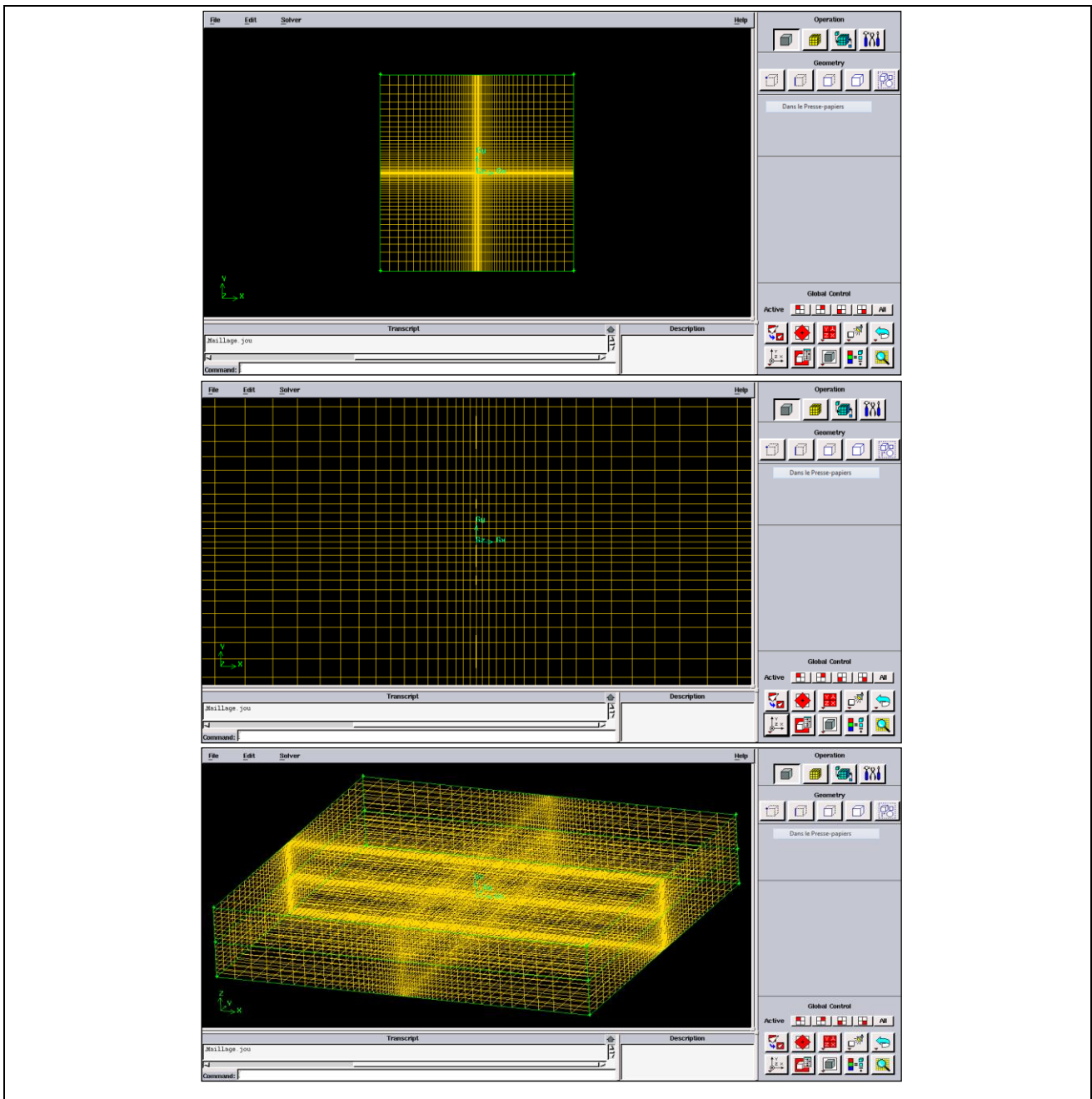


Fig.4-Maillage utilisé dans GAMBIT-

❖ Description de l'environnement FLUENT:

- Version :

FLUENT

Version: 3d, dp, pbns, lam (3d, double precision, pressure-based, laminar)

Release: 6.3.26

Cortex Version: 3.7.3

Graphics Version: 11.26-1, msw/win

OS Version: Windows NT 6.1.7600

Copyright (c) 2006 Fluent Inc.

All Rights Reserved

- **Quelques caractéristiques :**

Solveurs simple précision et double précision:

Les deux versions simple précision et double précision de Fluent sont disponibles sur toutes les plates-formes informatiques. Pour la plupart des cas, le solveur simple précision sera suffisamment exact, mais certains types de problèmes peuvent bénéficier de l'utilisation d'une version double précision.

Plusieurs exemples sont donnés ci-dessous:

- _ Si la géométrie a des caractéristiques d'échelles de longueur très disparates (par exemple, un très long tube mince), des calculs en simple précision peuvent ne pas être suffisants pour représenter les coordonnées du nœud.
- _ Si la géométrie implique plusieurs boîtiers reliés par des tubes de petit diamètre (par exemple, les collecteurs d'automobile), des niveaux de pression moyens peuvent être présents, mais dans certaines zones, ils peuvent être assez grands (puisque l'on ne peut définir qu'un seul emplacement global de pression de référence).

Des calculs double précision peuvent donc être nécessaires pour résoudre les différences de pression qui conduisent à l'écoulement, puisque ceux-ci seront généralement beaucoup plus petits que les niveaux de pression.

- _ Pour les problèmes conjugués portant sur des rapports de conductivité thermique élevée et / ou à ratio élevé, la convergence et / ou à l'exactitude peut être altérée avec le solveur de simple précision, due à un transfert inefficace de l'information limite.

Définition de la version Solver de la ligne de commande :

Lorsque vous démarrez FLUENT de la ligne de commande, vous pouvez spécifier la dimension du problème (2D ou 3D), ainsi que si vous voulez un calcul simple précision ou double précision :

- fluent 2d dirige les deux dimensions, en solveur simple précision,
- fluent 3d dirige les trois dimensions, en solveur simple précision,
- fluent 2ddp dirige les deux dimensions, en solveur double précision, et
- fluent 3ddp dirige les trois dimensions, en solveur double précision.

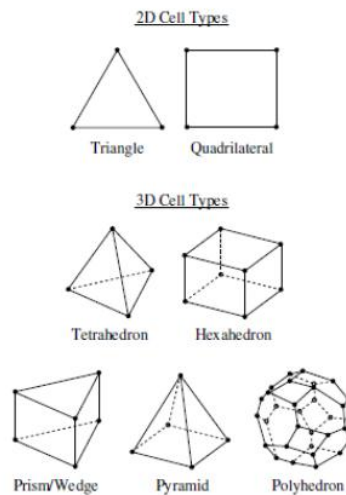


Fig.5-Types de cellules-

Raffinage :

L'erreur de troncature est la différence entre les dérivées partielles dans les équations régissant et leurs approximations discrètes. L'évolution rapide du volume cellulaire entre cellules adjacentes se traduit par de plus grandes erreurs de troncature. FLUENT fournit la capacité d'améliorer la finesse de la maille, par raffinement sur la base de la variation de volume de la cellule ou du gradient du volume cellulaire. Pour plus d'informations sur le perfectionnement de la grille en fonction des variations du volume cellulaire.

Réorganisation du domaine et des zones :

La réorganisation du domaine peut améliorer les performances de calcul du solveur par : réorganisation des nœuds, des faces, et des cellules de la mémoire.

Le sous-menu Grille /Réorganiser contient :

réordonner les commandes pour le domaine et les zones, ainsi que pour l'impression de la bande passante des partitions présentes de la grille. Le nom de domaine peut être commandé à accroître l'accès de la mémoire, l'efficacité, et les zones peuvent être réorganisées pour l'interface utilisateur de commodité.

La largeur de bande donne une idée de la distribution des cellules dans les zones et dans la mémoire.

Vue d'ensemble de la définition des conditions aux limites :

Les conditions aux limites précisent le flux et les variables thermiques sur les limites du modèle physique. Elles sont, par conséquent, un élément essentiel des simulations FLUENT et il est important qu'elles soient spécifiées de façon appropriée.

Category	Zone Types
Faces	axis, outflow, mass flow inlet, pressure far-field, pressure inlet, pressure outlet, symmetry, velocity inlet, wall, inlet vent, intake fan, outlet vent, exhaust fan
Double-Sided Faces	fan, interior, porous jump, radiator, wall
Periodic	periodic
Cells	fluid, solid (porous is a type of fluid cell)

Tableau 1-Types de zones répertoriés par catégorie-

Utilisation des conditions aux limites du flux :

Cette section donne un aperçu des limites d'écoulement dans FLUENT et comment les utiliser.

FLUENT fournit 10 types de zones pour la spécification des entrées d'écoulement et sorties: entrée de vitesse, de pression d'entrée, entrée de débit massique, sortie de pression, en champ lointain de pression, sorties, évent d'entrée, d'un ventilateur d'admission, évent de sortie, et un ventilateur d'échappement.

Les options de condition d'entrée et de sortie aux limites dans FLUENT sont les suivantes:

_Des conditions aux limites de la vitesse d'entrée sont utilisées pour définir la vitesse et les propriétés scalaires du flux au niveau des limites d'entrée.

_Des conditions aux limites de la pression d'entrée sont utilisées pour définir la pression totale et d'autres quantités scalaires à l'entrée des flux.

_Des conditions aux limites du flux de masse sont utilisées dans les écoulements compressibles,

pour prescrire un débit massique à une entrée. Il n'est pas nécessaire d'utiliser des entrées d'écoulement en masse incompressible car lorsque la densité est constante, la vitesse d'entrée des conditions aux limites va améliorer le débit massique.

_Des conditions aux limites de l'orifice de sortie de pression sont utilisées pour définir la pression statique à écoulement.

_Des conditions aux limites de sortie sont utilisées pour modéliser les sorties de flux où les détails de la vitesse et de la pression, elles ne sont pas connues avant la solution du problème de la circulation.

_Les conditions aux limites d'arrivée d'air sont utilisées pour modéliser une entrée de ventilation avec une perte déterminée de coefficient, direction d'écoulement, et d'ambient (admission), la pression totale et la température.

_Des conditions aux limites du ventilateur d'admission sont utilisées pour modéliser un ventilateur d'aspiration externe avec un saut spécifié de pression, sens de l'écoulement, et d'ambiante (admission), la pression totale et la température.

_ Les conditions aux limites de sortie d'air sont utilisées pour modéliser un événement de sortie ayant une valeur spécifiée.

_Des conditions aux limites du ventilateur d'échappement sont utilisées pour modéliser un ventilateur externe avec un saut de pression spécifié et ambiante (décharge) de pression statique.

Définition des conditions aux limites multiphasiques :

Lorsque l'on utilise un des modèles multiphasiques tels que la méthode VOF, la modèle de mixture, ou le modèle Eulérien pour un écoulement polyphasique, on a besoin de spécifier des fractions de volume pour les phases secondaires et (pour certains modèles) des paramètres supplémentaire.

Définition des matériaux :

Une étape importante dans la mise en place du modèle est de définir les matériaux et leurs propriétés physiques.

Les propriétés des matériaux sont définies dans le panneau dédié aux matériaux, où sont entrées les valeurs des propriétés qui sont pertinentes pour le traitement du problème qui a été défini dans le panneau dédié au Modèle.

Parmi les propriétés à définir, l'on peut citer :

- _La Densité et/ou les poids moléculaires
- _La viscosité
- _La Capacité calorifique
- _La Conductivité thermique
- _Les coefficients de diffusion à travers une UDS (User Defined Scalar)
- _Les Coefficients de diffusion de masse
- _Les Enthalpies standards de l'Etat
- _Les Paramètres de la théorie cinétique

Ecoulements :

Un grand nombre de flux rencontrés dans la nature et en technologie est un mélange de phases. Les phases physiques de la matière sont le gaz, liquide, solide, mais le concept de phase dans un système multiphasique d'écoulement est appliqué dans un sens plus large.

En écoulement polyphasique, une phase peut être définie comme un groupe identifiable d'un matériau qui a une réponse particulière à inertie et interaction avec le flux et le champ de potentiel dans lequel il est immergé. Par exemple, particules solides de tailles différentes de la même matière peuvent être traitées comme des différentes phases parce que chaque ensemble de particules de même taille aura une réponse dynamique similaire au champ d'écoulement.

Les régimes de l'écoulement polyphasique :

Les régimes d'écoulement multiphasiques peuvent être regroupés en quatre catégories: gaz-liquide ou liquide-liquide flux; flux gaz-solide; flux de liquide-solide; et les flux triphasés.

CHAPITRE 3

Présentation et Discussion des Résultats

3.1. Paramètres de la modélisation :

On considère un faisceau laser Nd-YAG doublé en fréquence dont les caractéristiques sont :

- Longueur d'onde : $\lambda = 532 \text{ nm}$
- Durée du pulse : $\tau = 10 \text{ ns}$
- Energie : $E = 8 \text{ mJ}$
- Rayon de la tache focale : $r = 75 \text{ }\mu\text{m}$.

Les caractéristiques de l'échantillon de verre en borosilicate BK7 sont :

- Densité : $\rho = 2510 \text{ kg/m}^3$
- Epaisseur : $h = 10 \text{ }\mu\text{m}$.

On déduit les principaux paramètres utilisés dans notre modélisation tels que :

- La puissance du faisceau laser : $P = E/\tau = 8 \cdot 10^{-3}/10 \cdot 10^{-9} = 800000 \text{ W}$
- L'irradiance : $I = P/\pi r^2 = 8 \cdot 10^5/\pi \cdot (75 \cdot 10^{-6})^2 = 4,52 \cdot 10^{13} \text{ W/m}^2$
- La densité de puissance volumique : $Q = I/h = 4,52 \cdot 10^{18} \text{ W/m}^3$
- La pression de recul est prise égale à : $P_{\text{recul}} = 10^9 \text{ Pascal}$.

D'où on pourra calculer les paramètres suivants :

- La vitesse d'expansion de la vapeur est déduite de : $P_{\text{recul}} = \rho v^2$

$$\text{d'où : } v = 631,19 \text{ m/s}$$

L'énergie correspondante libérée par le plasma est de 1,1 eV [11].

3.2. Les différentes étapes de la modélisation :

Toutes les étapes concernant les itérations faites par le processeur FLUENT sont représentées dans le tableau suivant :

Etape	Intervalle de temps/instant (ns)	Durée (ns)	Energie	Pression	Remarque
A	t : [0-10[	10	Oui	Non	En présence d'énergie et absence de pression
-	t= 10	-	Non	Non	On annule l'énergie
B	t : [10-15[	5	Non	Non	-
-	t= 15	-	Non	Oui	On active la pression
C	t : [15-65]	50	Non	Oui	En présence de pression et absence d'énergie
D	t : [65-115]	50	Non	Oui	-
E	t : [115-165[	50	Non	Oui	-
-	t= 165	-	Non	Non	On annule la pression
F	t : [165-265]	100	Non	Non	En absence de pression et d'énergie

Tableau 2-Récapitulatif des étapes de la modélisation-

3.3. Les résultats de la modélisation :

Les premières figures dans ce chapitre représentent la variation de température au niveau du cratère, ainsi que la forme finale de ce dernier.

Les figures qui suivent démontrent respectivement, les évolutions (correspondant aux six étapes citées dans le tableau 2 : A, B, C, D, E, F) de : la température, la température statique (décrivant le cratère selon le plan horizontal), la température statique (décrivant le cratère selon le plan vertical), la pression statique (décrivant le cratère selon le plan horizontal), la pression statique (décrivant le cratère selon le plan vertical), la fraction liquide (décrivant le cratère selon le plan horizontal), la fraction liquide (décrivant le cratère selon le plan vertical), la fraction volumique (décrivant le cratère selon le plan horizontal) et la fraction volumique (décrivant le cratère selon le plan vertical).

On peut remarquer que le cratère commence à se former à partir de l'instant t=15 ns, dès que l'on applique la pression de recul, qui fait diminuer la température ayant atteint la valeur de

11000 Kelvin comme température maximale durant la première étape (A) due à l'énergie de l'impulsion laser qui a duré 10 ns, cette température est restée constante jusqu'à l'instant $t = 65$ ns, comme on remarque le phénomène de changement d'état qui était représenté dans l'étape (E), après cela la température a diminué jusqu'au seuil durant l'étape (D), puis elle est restée constante à cette température après que l'effet de la pression de recul ait été annulé.

○ Résultats de la phase finale :

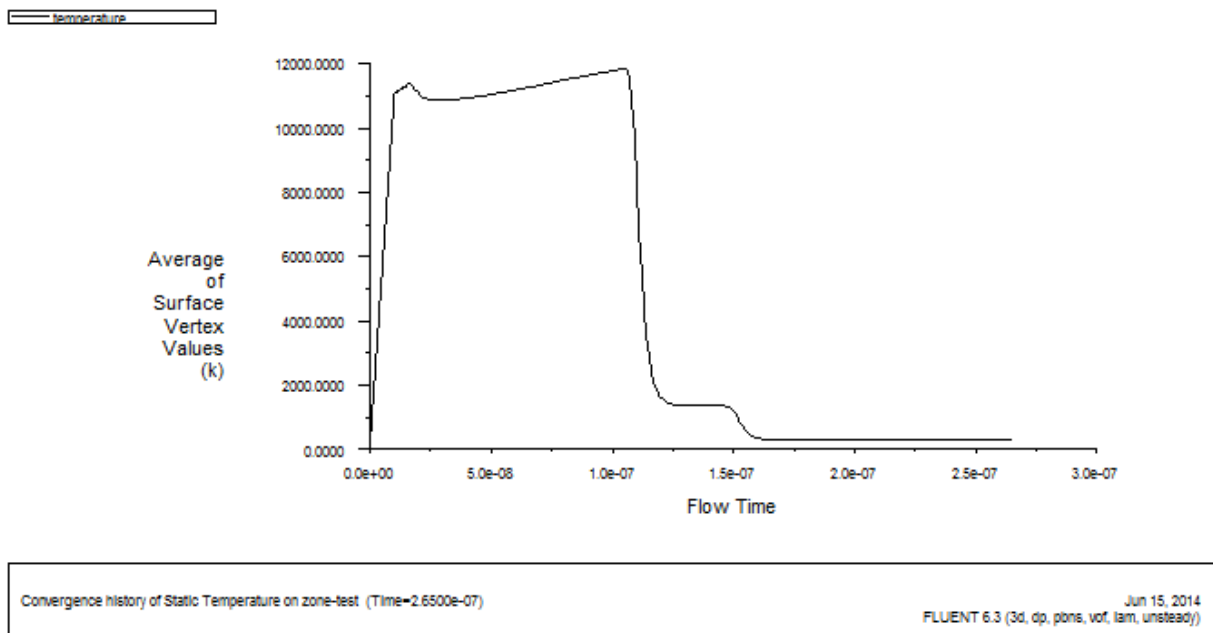
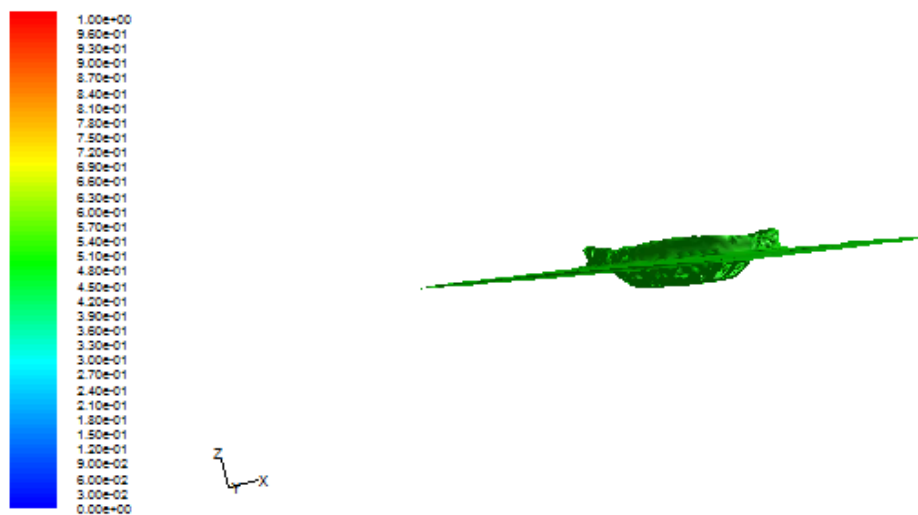


Fig.6-Convergence de la température statique-



Contours of Volume fraction (phase-air) (Time=2.6500e-07) Jun 15, 2014
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbn, vof, lam, unsteady)

Fig.7-Contours de la fraction volumique précisant la profondeur du cratère-

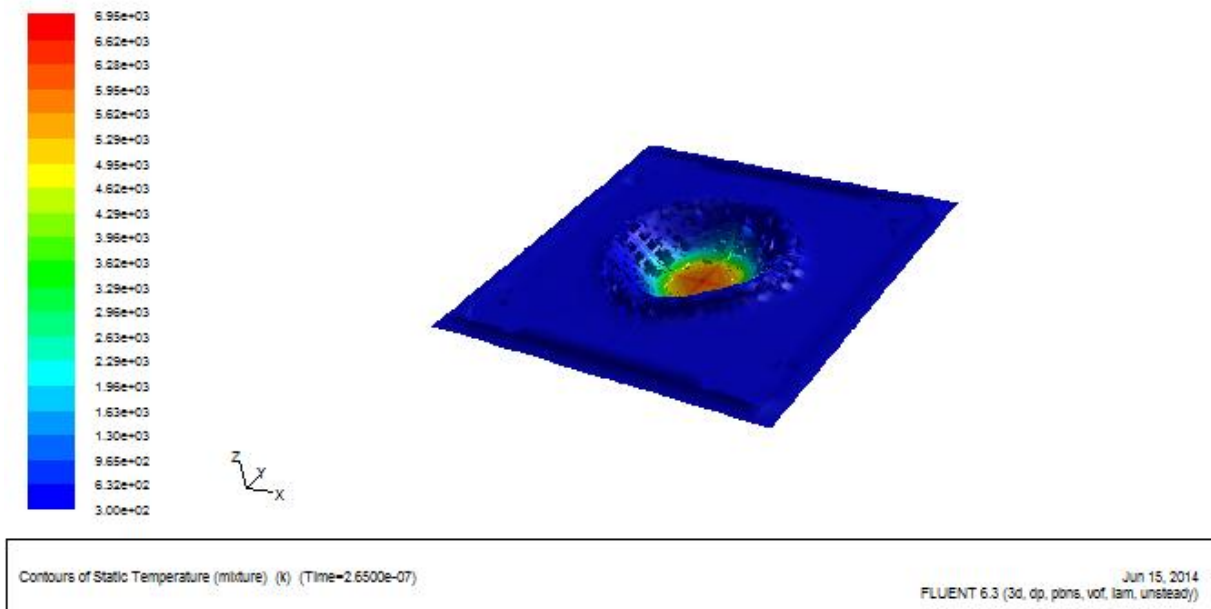


Fig.8-Contours de la température statique (plan horizontal)-

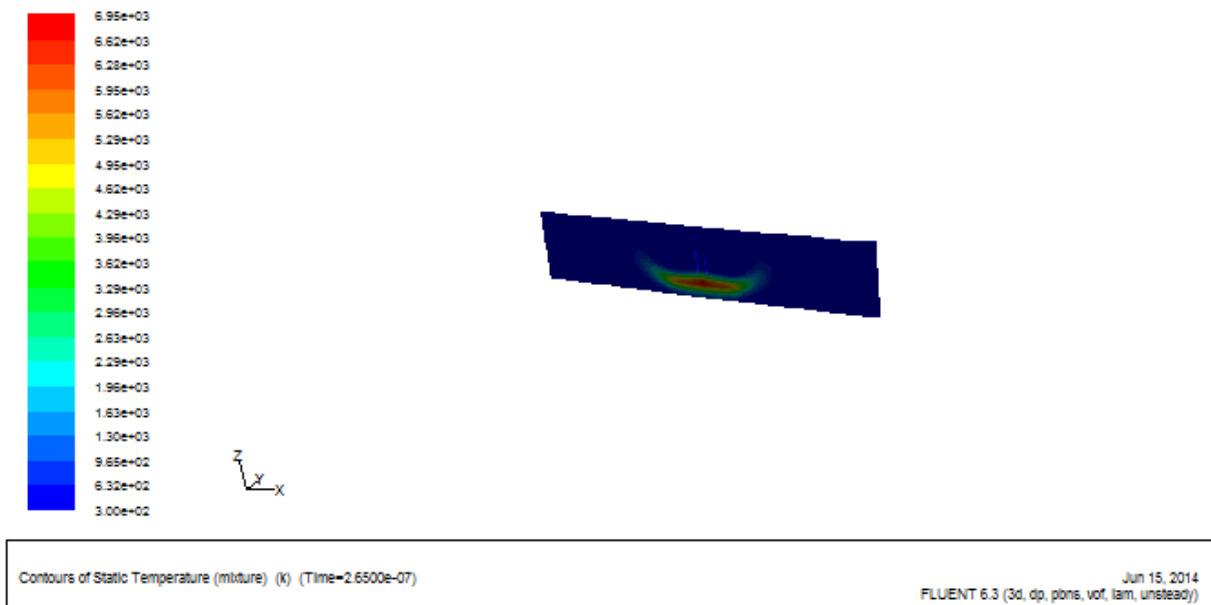


Fig.9-Contours de la température statique (plan vertical)-

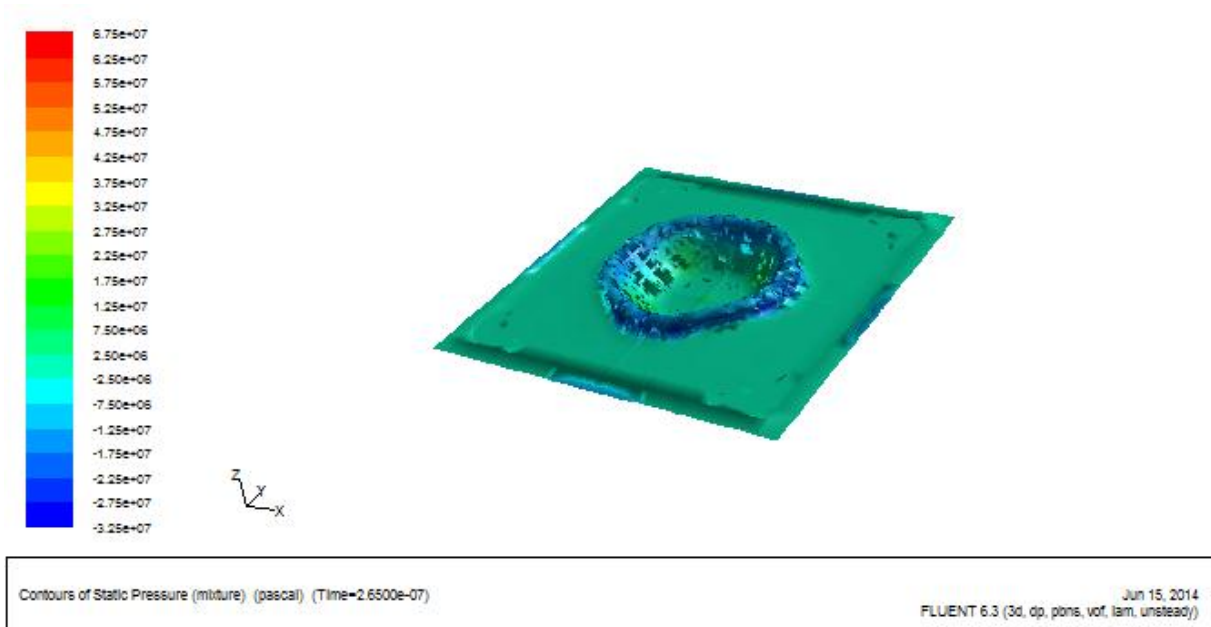


Fig.10-Contours de la pression statique (plan horizontal)-

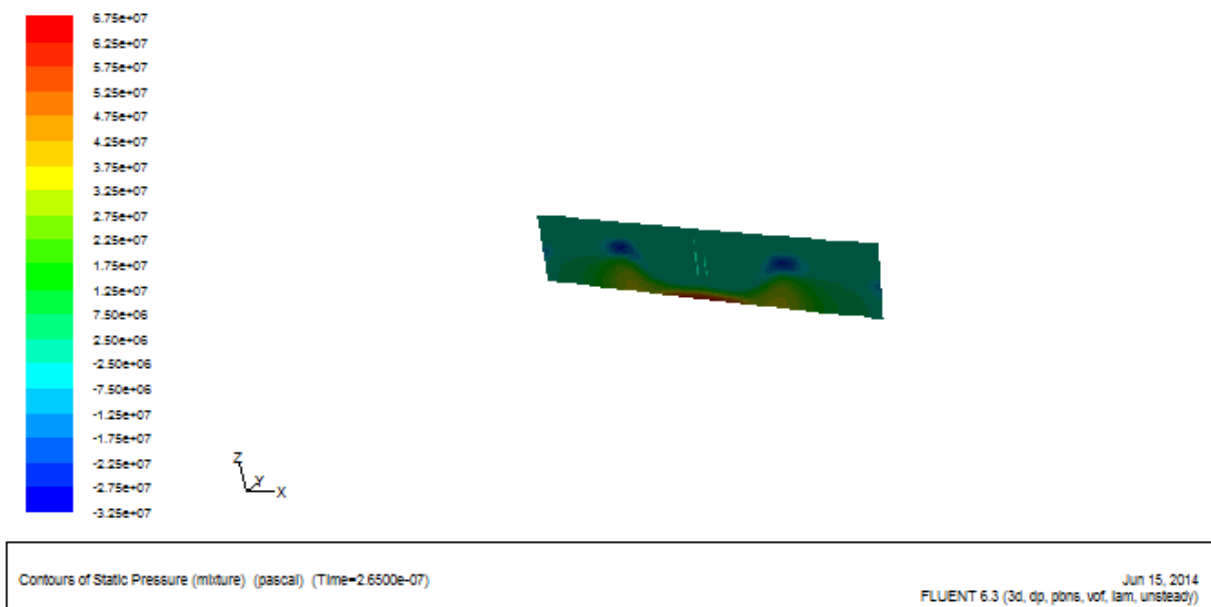


Fig.11-Contours de la pression statique (plan vertical)-

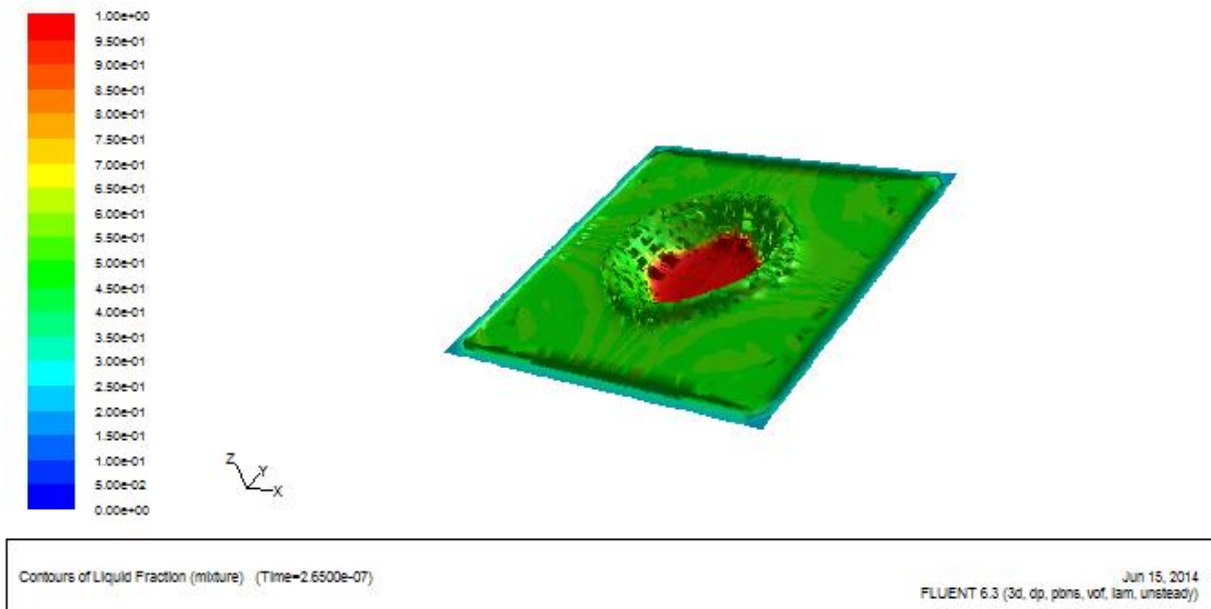


Fig.12-Contours de la fraction liquide (plan horizontal)-

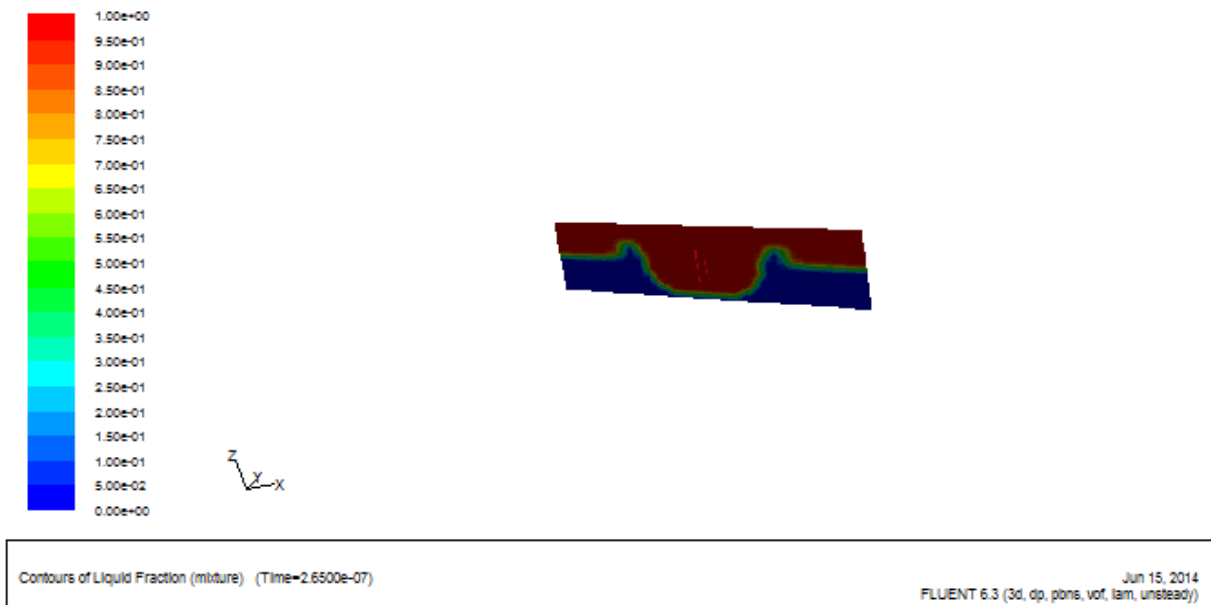


Fig.13-Contours de la fraction liquide (plan vertical)-

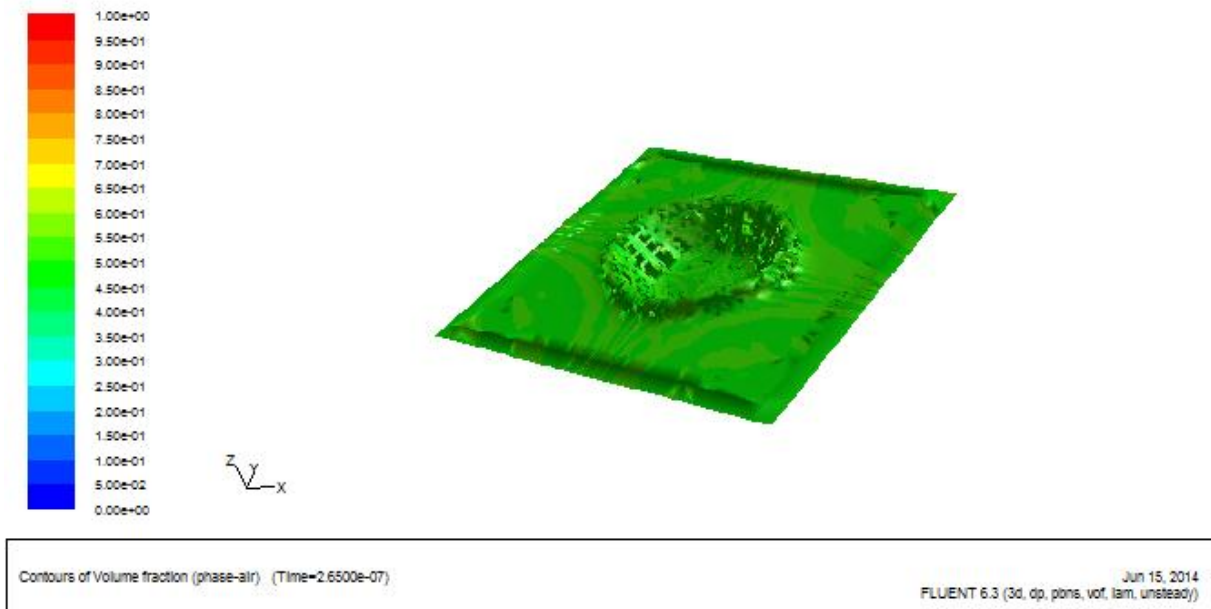


Fig.14-Contours de la fraction volumique (plan horizontal)-

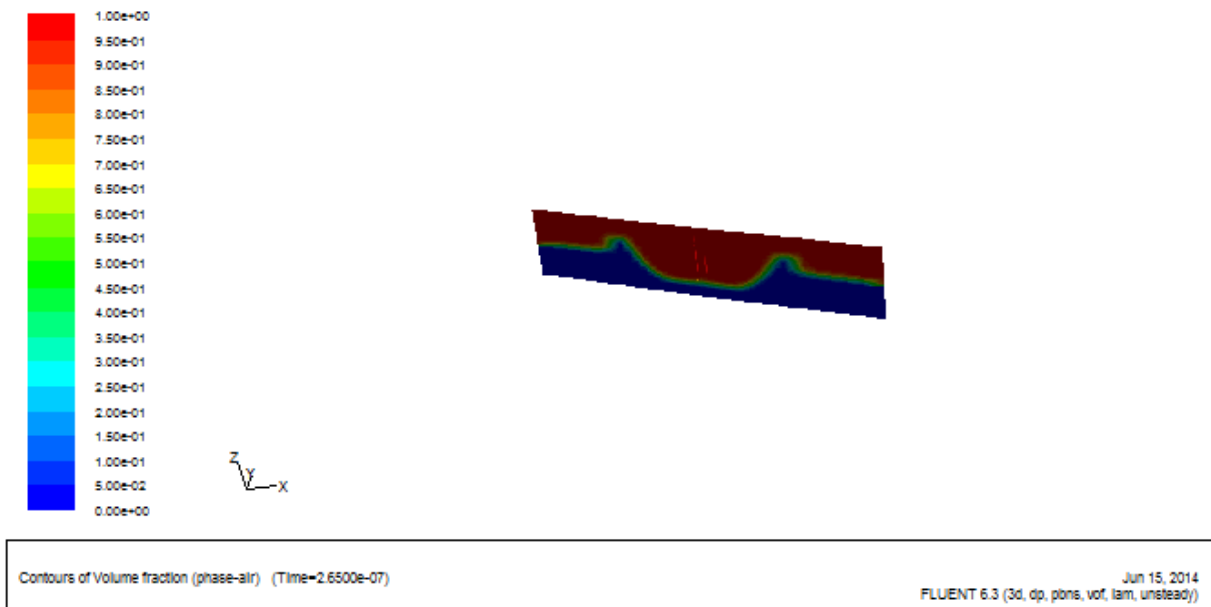


Fig.15-Contours de la fraction volumique (plan vertical)-

○ Evolution de la température :

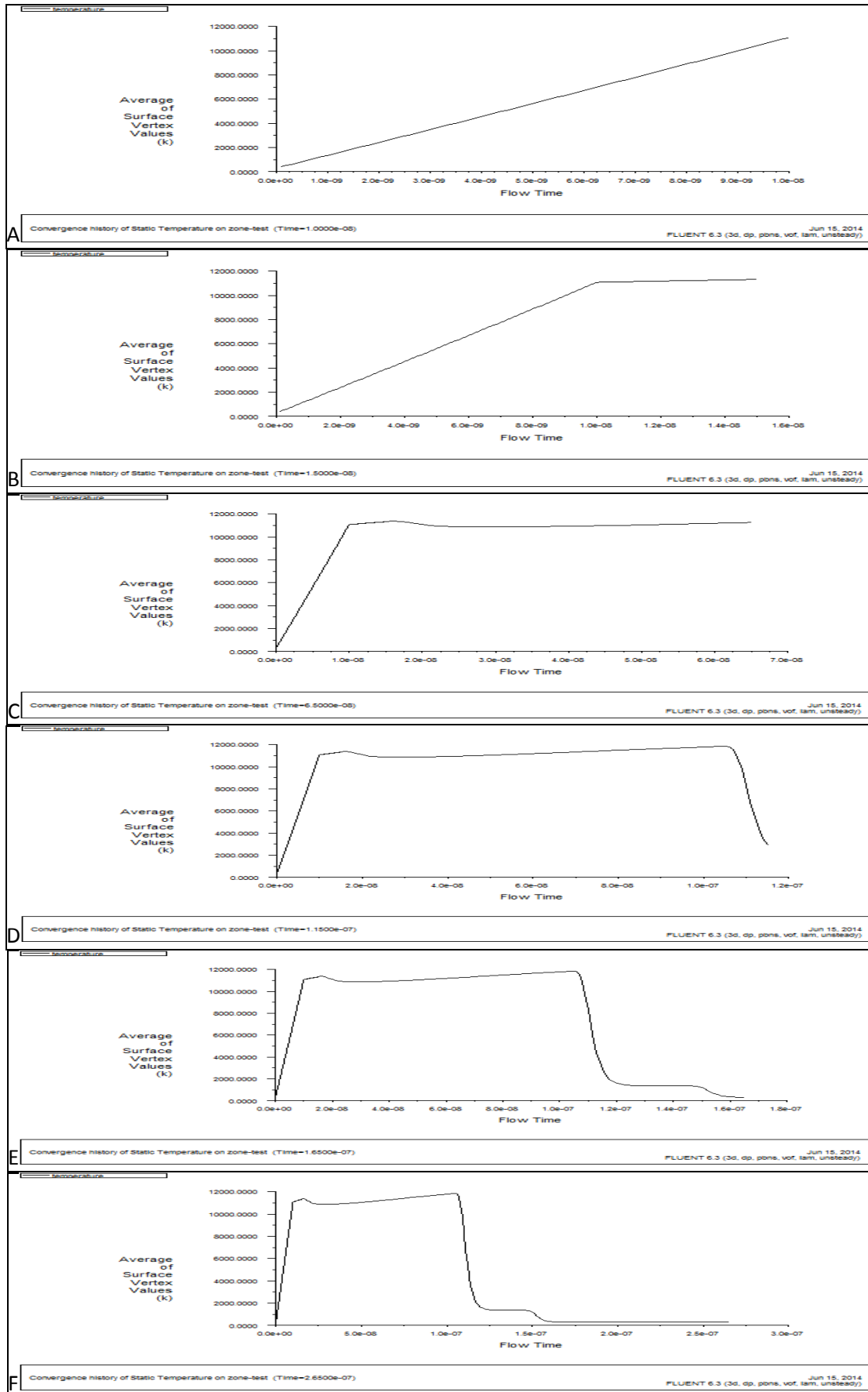


Fig.16-Evolution de la température-

○ Evolution de la température statique :

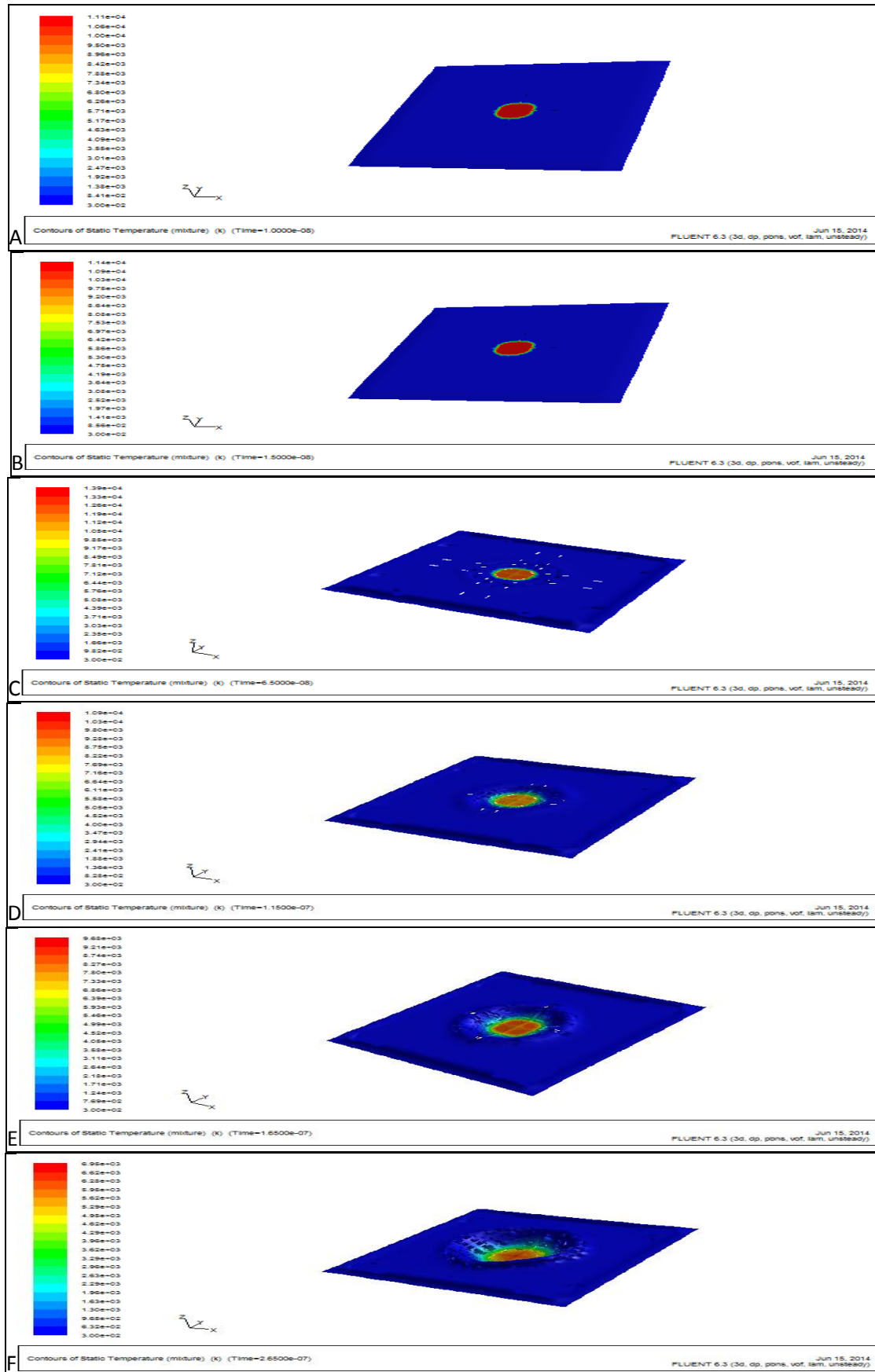


Fig.17-Evolution de la température statique selon le plan horizontal-

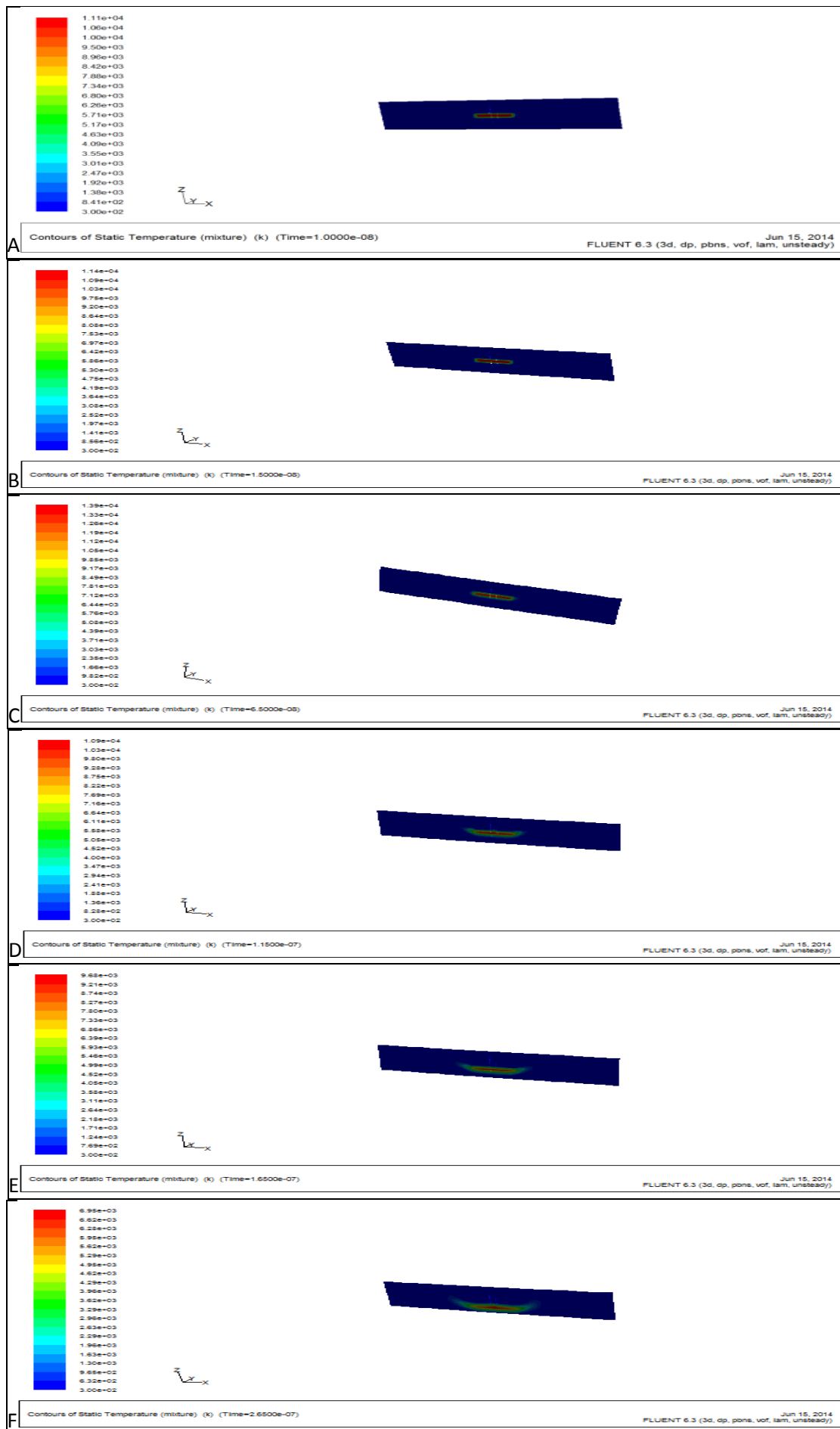


Fig.18-Evolution de la température statique selon le plan vertical-

○ Evolution de la pression statique :

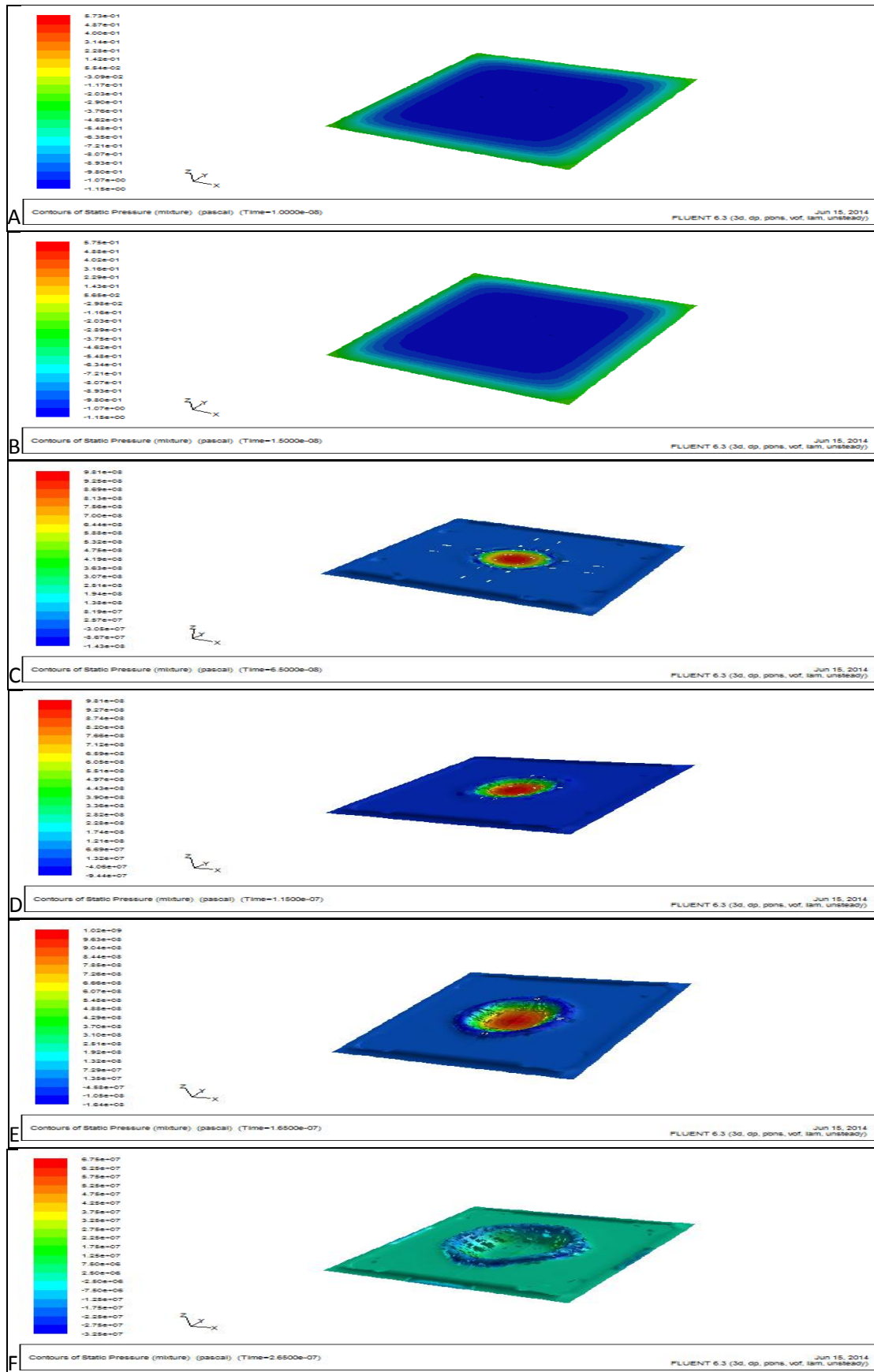


Fig.19-Evolution de la pression statique selon le plan horizontal-

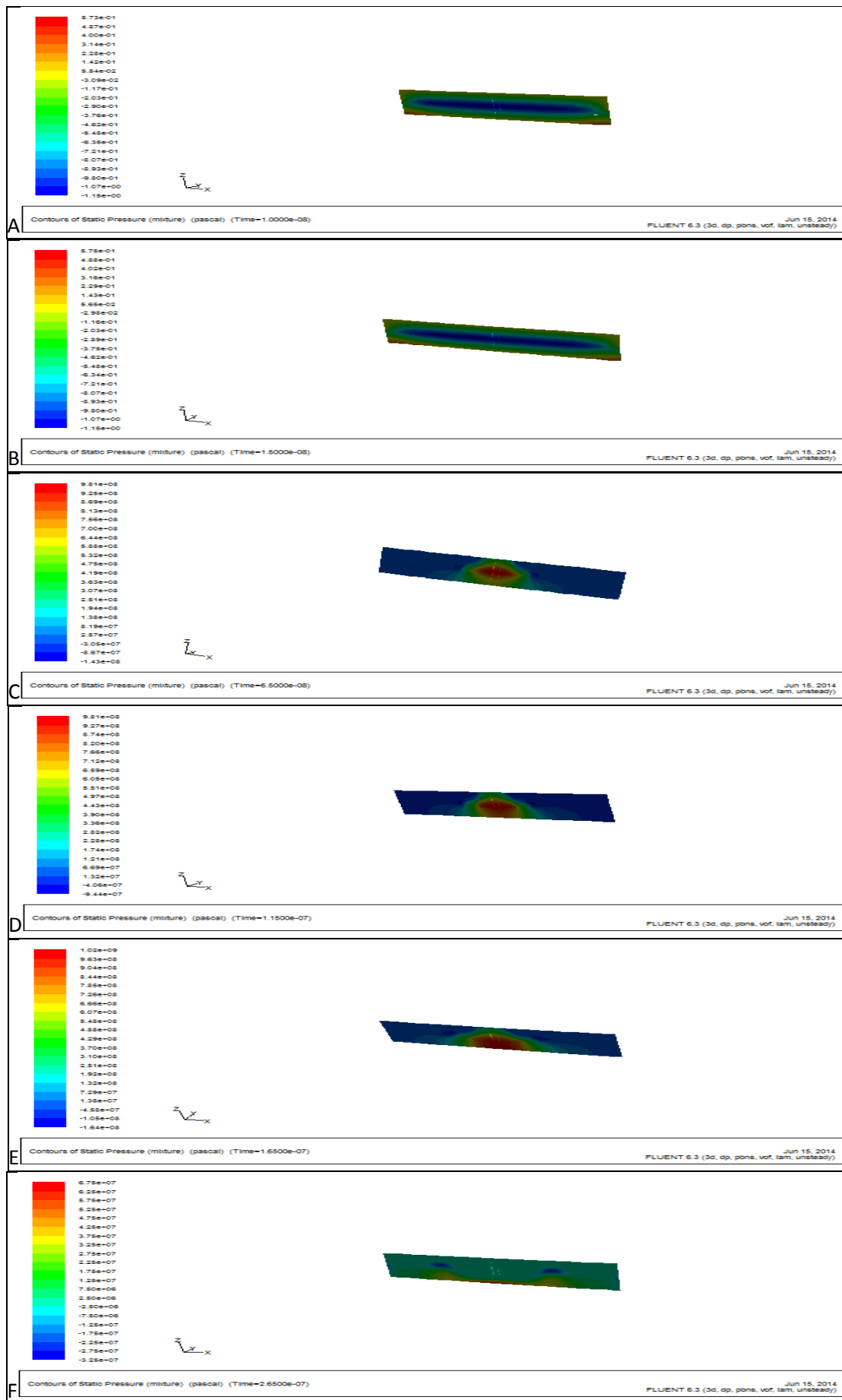


Fig.20-Evolution de la pression statique selon le plan vertical-

○ Evolution de la fraction liquide :

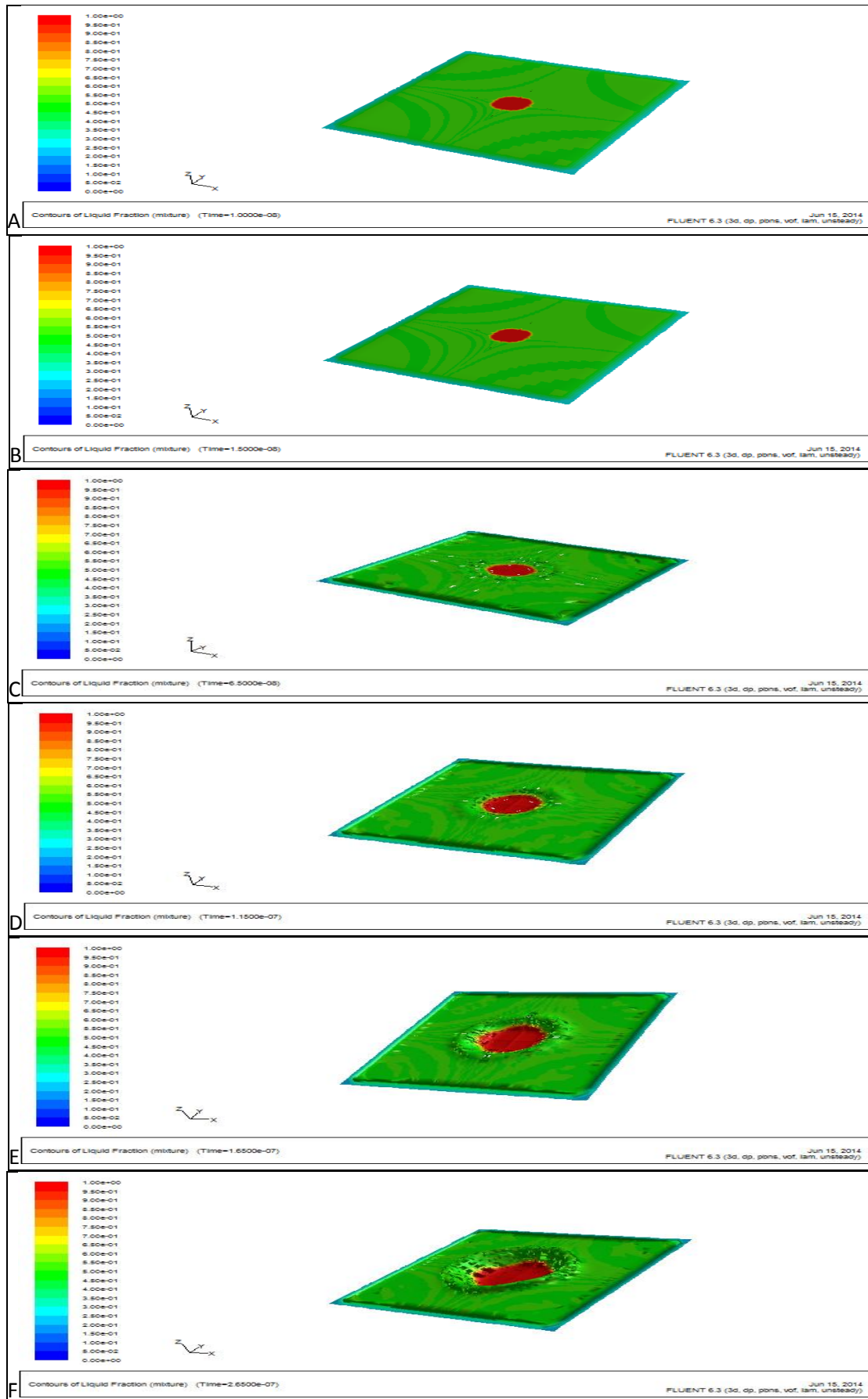


Fig.21-Evolution de la fraction liquide selon le plan horizontal-

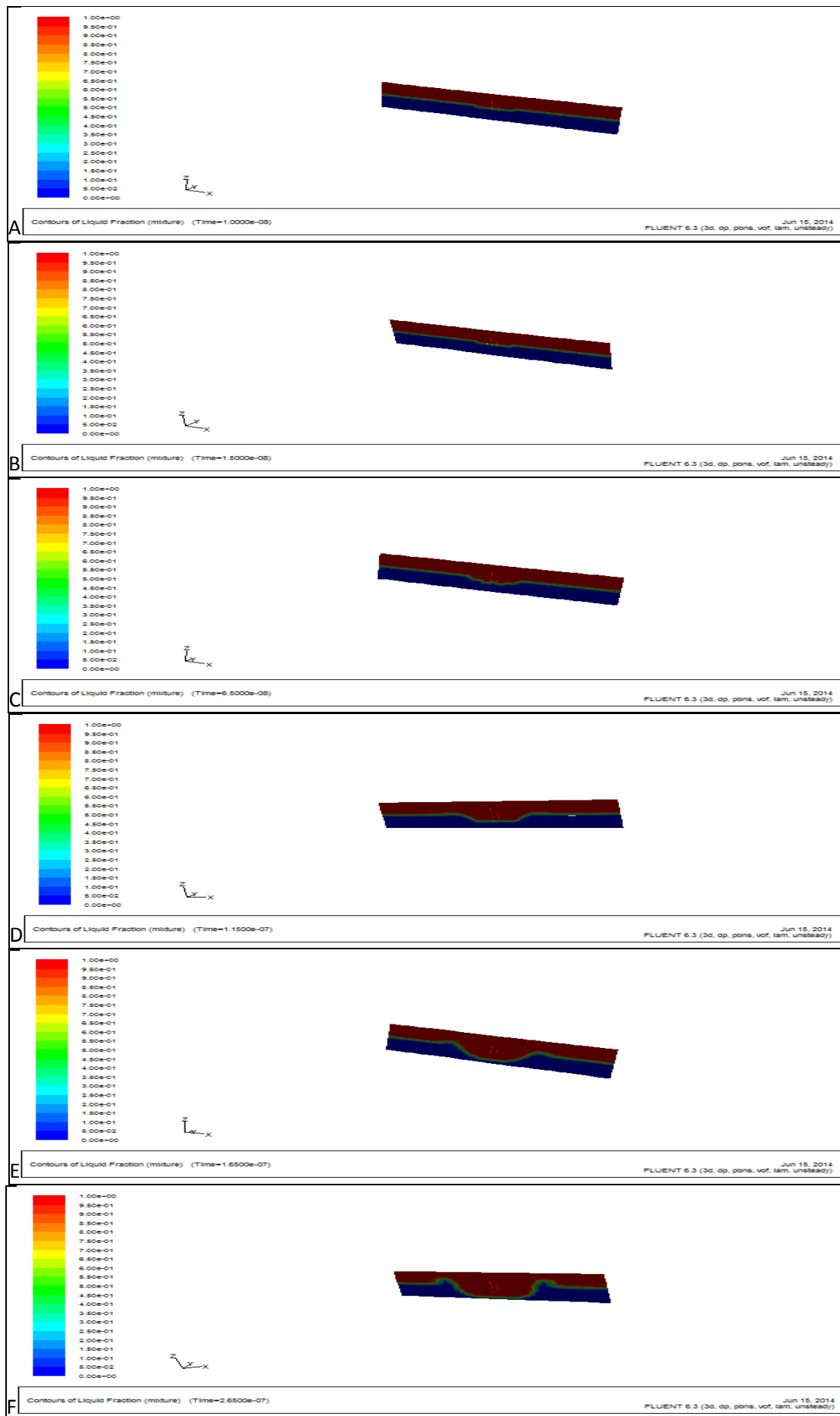


Fig.22-Evolution de la fraction liquide selon le plan vertical-

○ Evolution de la fraction volumique :

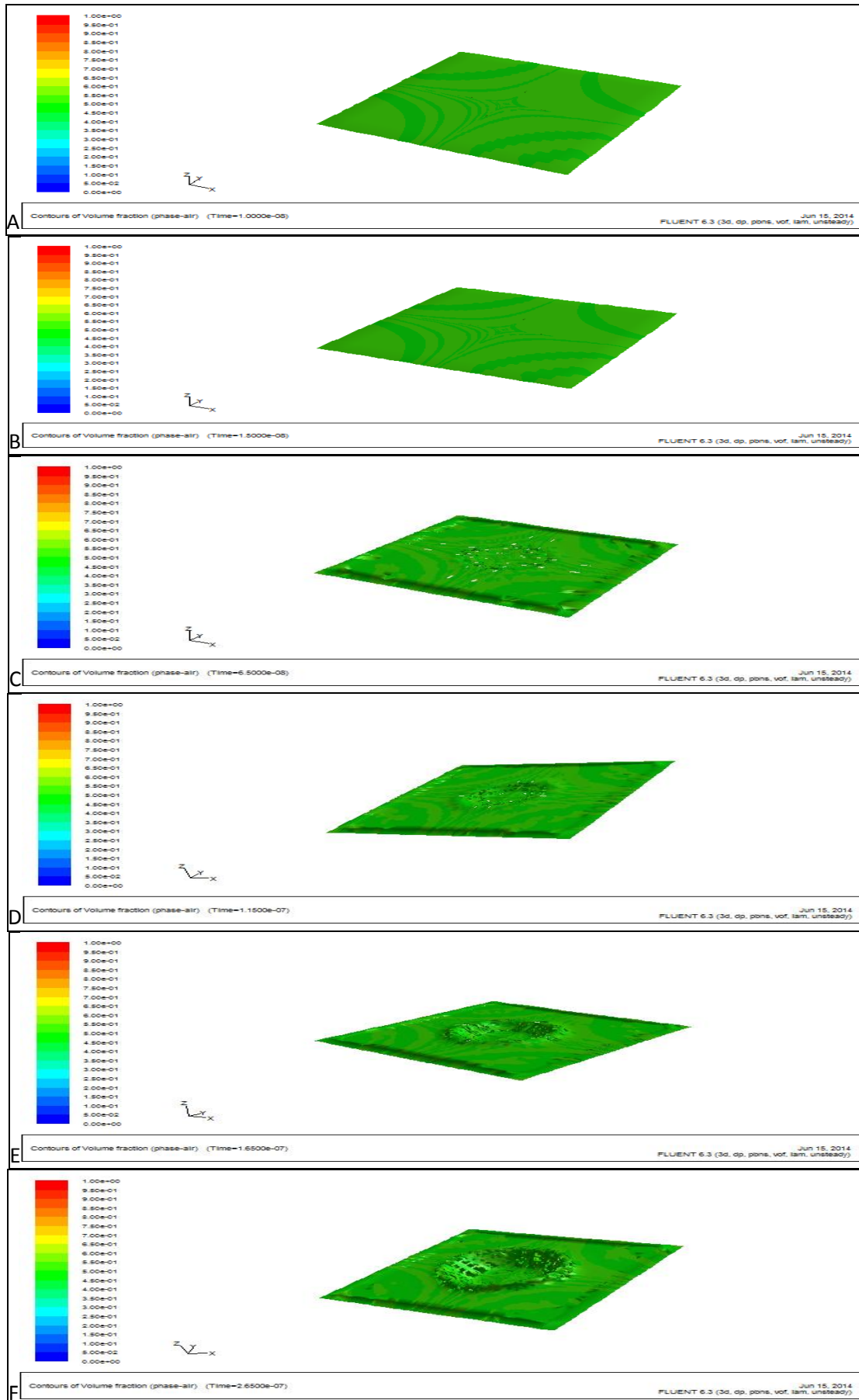


Fig.23-Evolution de la fraction volumique selon le plan horizontal-

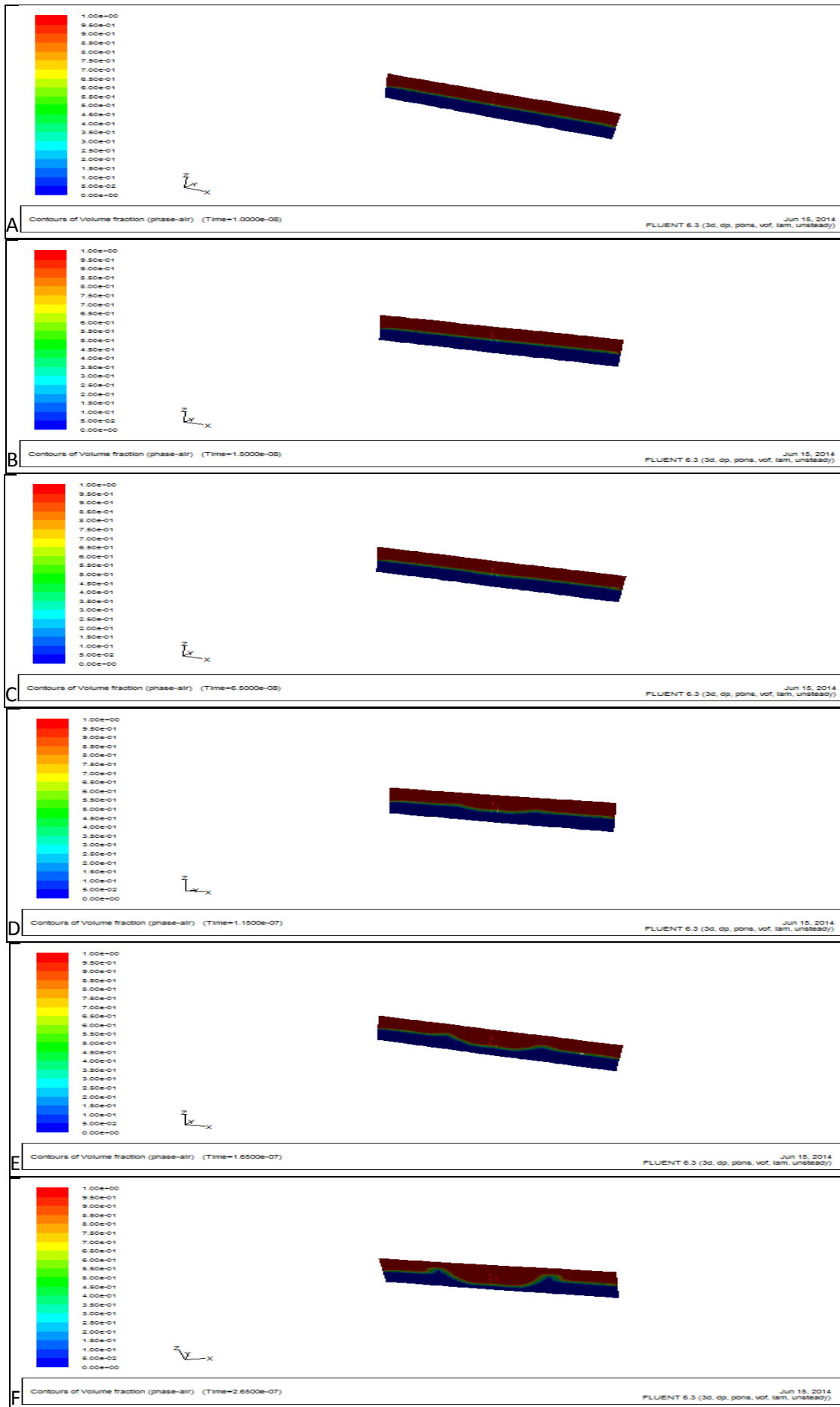


Fig.24-Evolution de la fraction volumique selon le plan vertical-

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous proposons une étude numérique sur la formation de cratères lors de l'interaction d'un faisceau laser Nd-YAG pulsé et doublé en fréquence, avec un substrat en verre borosilicate BK7. Le cratère qui se forme par ablation de la matière est simulé par le logiciel FLUENT/GAMBIT.

Un problème multiphasique est considéré à travers une phase gazeuse qui est l'air entourant le substrat, une phase liquide qui est le verre fondu, et une phase solide qui est représentée par le verre non affecté ou resolidifié. La simulation de la formation de cratère a nécessité la mise en œuvre d'une technique de suivi d'interfaces à travers la méthode Volume Of Fluid (VOF).

Le pré-processeur GAMBIT a permis de définir la géométrie 3D du problème pour un parallélépipède représentant l'échantillon de verre BK7. Un maillage en hexaèdres en volume et en quadrilatères en surface donne le caractère discret du problème résolu numériquement par la méthode des volumes finis.

Le processeur FLUENT a permis la résolution numérique des équations du problème qui sont : l'équation de Navier-Stokes ou de la quantité de mouvement, l'équation de l'énergie avec un terme source volumique représentant l'énergie laser déposée, et l'équation de suivi d'interface à travers la méthode VOF. La modélisation a permis de montrer l'évolution de la température et la formation de cratères ainsi que d'autres paramètres, d'une façon progressive tout au long des étapes avec les itérations et les schémas numériques adéquats.

Un post-traitement permet l'exploitation des résultats sous forme de courbes, d'images ou de films.

Cette étude pourrait être un prélude pour une investigation plus complète, qui concernerait un faisceau laser se déplaçant sur le substrat pour former des rainures par ablation laser dans un but d'applications en micro-fluidique, en MEMS, etc...

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

*« La lecture de tous bons livres est comme
une conversation avec les plus honnêtes gens
des siècles passés qui en ont été les auteurs,
et même une conversation étudiée,
en laquelle ils ne nous découvrent que
les meilleures de leurs pensées. »*
*René Descartes (1596-1650),
Discours de la méthode.*

Références Bibliographiques

- [1] J. E. Masse,
'Phénomènes physiques d'interaction laser-matière',
Application industrielle des lasers,
Résumé intervention Laser, 2008,
30 pages.
- [2] Jérémie Capoulade,
'Etude multi-échelle de l'initiation de l'endommagement laser en surface et dans le volume de matériaux optiques',
École Doctorale : Physique & Sciences de la Matière,
Université Paul Cézanne, Aix-Marseille III (France), 2008,
162 pages.
- [3] Jean-Luc Raimbault,
'Introduction à la Physique des Plasmas',
Université Paris-Sud 11, 2011.
- [4] A. Saleres, F. Bonneau, P. Combis et A. Couairon,
'Interaction rayonnement laser matière et simulation numérique',
Repères, Le marquage,
Département de Physique Théorique et appliquée, CEAIDAM Ile de France, 2001.
- [5] David Helie,
'Micro-usinage de lamelles de verre au laser femtoseconde',
Maîtrise en Physique,
Département de Physique, Génie physique et d'Optique,
Faculté des Sciences et Génie,
Université Laval, Québec, 2011,
103 pages.

- [6] Kamal Gueraoui,
'Méthode des volumes finis',
Analyse numérique,
Université Mohammed V– AGDAL, Rabat, 2010,
42 pages.
- [7] Ecoulements multiphasiques,
'Principes généraux et notions de base',
Pages 21-25.
- [8] François Vidal et Al,
'Les plasmas générés par des impulsions laser ultra-brèves et intenses',
Physics in Canada, 2012,
VOL. 68, NO. 4.
- [9] Anne Aubreton,
'Modélisation et étude expérimentale d'un plasma métallique créé par ablation laser',
Thèse de Doctorat de L'Université Paul Sabatier, TOULOUSE III, 2002,
190 pages.
- [10] Guillaume Clair,
'Etudes théorique et expérimentale des plasmas produits par laser en vue de leur application à l'analyse chimique des matériaux en environnement complexe',
Thèse de Doctorat, spécialité « Physique, Chimie, Sciences de la matière et nanosciences »,
Université d'Aix-Marseille II - Campus de Luminy, 2011,
159 pages.
- [11] Hans Breuer,
'ATLAS DE LA PHYSIQUE',
Ed. Le Livre de Poche, France, 1997,
403 pages,
ENCYCLOPEDIES D'AUJOURD'HUI,
ISBN : 2-253-13016-8.

<http://www.troteclaser.com/fr-FR/Service-Technique/FAQ/Pages/Types-de-Laser.aspx>

<http://asertp.e-monsite.com/pages/dossier/differants-type-de-laser.html>

http://physique.unice.fr/sem6/2009-2010/PagesWeb/Laser/Continu_impulsionnel_FR.html

ANNEXES

*"Je ne me décourage pas, car chaque tentative infructueuse qu'on laisse derrière soi constitue un autre pas en avant."
Thomas Edison*

*"S'améliorer est la plus grande marque de respect que l'on porte à l'égard de soi."
François Gervais*

*"Le diamant, c'est du charbon qui a patienté."
Julos Beaucarne*

Journal File for GAMBIT

```
/ Journal File for GAMBIT 2.3.16, Database 2.3.14, ntx86 SP2006032921
/ Identifier "Maillage"
/ File opened for write Sun Jun 08 02:21:57 2014.
identifier name "Maillage" new saveprevious
volume create width 10 depth 10 height 1 brick
volume move "volume.1" offset 0 0 -0.5
volume create width 10 depth 10 height 1 brick
volume move "volume.2" offset 0 0 0.5
face connect "face.6" "face.7" real
undo begingroup
edge picklink "edge.12" "edge.11" "edge.9" "edge.10" "edge.22" "edge.21" \
"edge.23" "edge.24" "edge.2" "edge.4" "edge.3" "edge.1"
edge mesh "edge.1" "edge.3" "edge.4" "edge.2" "edge.10" "edge.9" "edge.11" \
"edge.12" "edge.24" "edge.23" "edge.21" "edge.22" biexponent ratio1 0.2 \
intervals 60
undo endgroup
undo begingroup
edge picklink "edge.8" "edge.20" "edge.7" "edge.19" "edge.6" "edge.18" \
"edge.17" "edge.5"
edge mesh "edge.5" "edge.17" "edge.18" "edge.6" "edge.19" "edge.7" "edge.20" \
"edge.8" successive ratio1 1 intervals 8
undo endgroup
face mesh "face.1" "face.2" "face.3" "face.4" "face.5" "face.6" "face.8" \
"face.9" "face.10" "face.11" "face.12" map size 1
volume mesh "volume.1" "volume.2" map size 1
physics create "substrat" btype "WALL" face "face.1" "face.2" "face.3" \
"face.4" "face.5"
physics create "air ambient" btype "PRESSURE_OUTLET" face "face.8" "face.9" \
"face.10" "face.11" "face.12"
physics create "verre BK7" ctype "FLUID" volume "volume.1"
physics create "air" ctype "FLUID" volume "volume.2"
export fluent5 "Maillage.msh"
/ File closed at Sun Jun 08 03:08:27 2014, 36.64 cpu second(s), 22914776 maximum memory.
```

Report File for FLUENT

Welcome to Fluent 6.3.26

Copyright 2006 Fluent Inc.
All Rights Reserved

Loading "C:\Fluent.Inc\fluent6.3.26\lib\fl_s1119.dmp"
Done.

Loading "C:\Users\Nassima/.cxl原因out"
Done.

> Reading "C:\Users\Nassima\Desktop\2° MGM\PFE\Maillage\Modele.cas" ...
Done.
Reading "C:\Users\Nassima\Desktop\2° MGM\PFE\Maillage\Modele.dat" ...
Done.

FLUENT

Version: 3d, dp, pbns, vof, lam, unsteady (3d, double precision, pressure-based, VOF, laminar, unsteady)

Release: 6.3.26

Title:

Models

Model	Settings
Space	3D
Time	Unsteady, 1st-Order Implicit
Viscous	Laminar
Heat Transfer	Enabled
Solidification and Melting	Enabled
Radiation	None
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Boundary Conditions

tache-laser

Condition	Value
-----------	-------

Material Name	verre-bk7
---------------	-----------

Specify source terms?	yes
-----------------------	-----

Source Terms	((x-momentum) (y-momentum) (z-momentum) (energy ((constant . 4.5500001e+18) (inactive . #f) (profile))))
--------------	--

pression-recul

Condition	Value
-----------	-------

Gauge Total Pressure (pascal)	1e+09
-------------------------------	-------

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)	0
--	---

Total Temperature (k)	300
-----------------------	-----

Direction Specification Method	1
--------------------------------	---

Solver Controls

Equations

Equation	Solved
----------	--------

Flow	yes
------	-----

Volume Fraction	yes
-----------------	-----

Energy	yes
--------	-----

Numerics

Numeric	Enabled
---------	---------

Absolute Velocity Formulation	yes
-------------------------------	-----

Unsteady Calculation Parameters

Material Properties

Material: verre-bk7 (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m ³	constant	2510
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	860
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	1.114
Viscosity	kg/m-s	constant	0.0099999998
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	62.32
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	0
Reference Temperature	k	constant	298.14999
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Melting Heat	j/kg	constant	20000
Solidus Temperature	k	constant	1060.15
Liquidus Temperature	k	constant	1093.15
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m ³	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
Standard State Enthalpy	j/kgmol	constant	0
Reference Temperature	k	constant	298.15
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711
L-J Energy Parameter	k	constant	78.6
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Degrees of Freedom		constant	0
Melting Heat	j/kg	constant	0
Solidus Temperature	k	constant	0
Liquidus Temperature	k	constant	0
Speed of Sound	m/s	none	#f